Ecole Centrale des Arts et Métiers

E.C.A.M.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ELECTRICITE

PREMIERE PARTIE

4e ANNÉE

Prof. : E. MEYER

AVERTISSEMENT DE L'AUTEUR

Les applications industrielles de l'électricité se développent de plus en plus et les techniques employées sont de plus en plus compliquées.

Dans le cadre d'un cours correspondant à une soixantaine de leçons, il ne peut être question d'aborder, encore moins de décrire l'ensemble de ces applications.

L'auteur devait faire un choix.

La plupart des ingénieurs devront s'occuper de distribution d'énergie électrique, de manutention, de soudure ou d'applications électrothermiques. Ces techniques font partie du cours.

Une place de choix devrait être réservée au couplage Ward Léonard et à ses dérivés en raison de l'application croissante de ce principe grâce aux progrès de l'électronique.

D'autres techniques ont également été abordées car elles renferment une certaine synthèse de nombreux problèmes de la vie courante de l'ingénieur. En les exposant, l'auteur vise avant tout à parachever la formation des futurs ingénieurs en les initiant à la résolution raisonnée de problèmes nouveaux, c'est-à-dire, à leur faire acquérir le "sens de l'électricité".

Le lecteur s'apercevra rapidement que la partie purement descriptive est négligée, l'auteur a cru inutile d'obliger les étudiants à un effort de mémoire sans intérêt puisqu'il en résulterait bien peu de choses un mois après l'examen final.

Le lecteur pourra compléter sa documentation en consultant la bibliographie annexée à la fin de la plupart des chapitres.

Par contre l'auteur désire absolument attirer l'attention des étudiants sur la nécessité absolue de possèder à fond la connaissance raisonnée des schémas.

Un étudiant doit être capable de reconstituer un schéma et justifier la nécessité de chaque partie constitutive.

Est considéré comme sans valeur à l'examen la reproduction même parfaite d'un schéma qui n'a pas été compris dans le sens indiqué ci-dessus.

Trop d'échecs sont dus au fait que l'étudiant croit que la mémoire permet de réussir un examen et qu'il suffit de reproduire des schémas pour réussir.

La connaissance du cours telle que l'auteur l'exige est impossible sans un travail régulier et personnel de réflexion qu'il est évidemment absurde d'entreprendre quelques jours avant l'ouverture de la session.

x

x x

Il n'est pas d'usage de citer dans un cours des adresses de firmes, l'auteur croit cependant qu'il rendra service aux jeunes ingénieurs s'il communique les adresses de constructeurs de matériel spécialisé.

x

x x

PLAN DU COURS

Le cours d'applications industrielles de l'électricité comprend les chapitres suivants :

1. Force motrice industrielle. Réseaux à haute et basse tension. Schémas. Mises à la terre. Types de matériel.

2. Traction électrique. Principes. Calcul d'un horaire, d'une sous-station. Schémas de principe.

3. L'électricité à bord des navires. Principes. Machines. Propulsion électrique. Schémas.

4. Engins électriques de levage et de manutention. Palans - Ponts roulants, portiques - etc. Schémas. Prescriptions pratiques.

5. Groupe Léonard, groupe Ward Léonard. Schémas dérivés. Applications.

6. Applications électrothermiques. Fours électriques à résistance, à arc, à induction.

7. Soudure électrique. En courant continu et courant alternatif. Machines rotatives, transformateurs de soudure. Machines automatiques.

8. Electrolyse. Principes. Machines spéciales.

9. Applications diverses. Electro-érosion, etc ...

x

x x

CHAPITRE I connaître à fond.

L E S R E S E A U X H T E T B T

1. PRODUCTION AUTONOME DE L'ENERGIE OU RACCORDEMENT AU RESEAU DE DISTRIBUTION :

Lors de la construction d'une nouvelle entreprise industrielle, un des premiers problèmes à résoudre est celui de l'alimentation en énergie électrique de l'usine projetée.

Deux solutions sont possibles :

a) Raccordement au réseau de distribution

b) Production autonome de l'énergie

En Europe Occidentale, la création d'une centrale autonome ne peut se justifier que dans un certain nombre de cas particuliers, elle est beaucoup plus justifiée dans les régions dépourvues de grands réseaux interconnectés où les frais de raccordement seront très élevés.

Cependant, il peut être intéressant d'établir en Europe une centrale autonome, si l'on dispose d'un combustible à bon marché, constitué par exemple de déchets de très faible valeur marchande ou difficilement transportables ou d'une chute d'eau facilement exploitable. D'autre part, il est toujours intéressant d'établir le prix de revient du kWh, fourni par une centrale autonome afin d'obtenir des conditions plus avantageuses du réseau public.

Cout du kWh produit dans une centrale (x) :

Le cout du kWh est fonction d'une série d'éléments:

a) Intérêts du capital investi.

b) Moyenne des dépenses annuelles d'entretien et de réparation des machines, du batiment et des installations.

(x) Dans une centrale thermique, on estime à 7000 f le coût des installations rapporté au kW installé et à 330 gr le combustible consommé par kWh en charge régulière, à 480 gr la consommation de charbon par kWh en régime de pointe.

c) Amortissement des machines, du batiment et des installations c'est-à-dire somme à mettre en réserve chaque année pour permettre après usure le remplacement des machines, du batiment et des installations. La durée d'amortissement est différente pour chacun des postes, par exemple 20 ans pour les machines, 60 ans pour les batiments. Les diverses périodes à considérer sont fonction du service à prévoir et des circonstances locales (climat, site, altitude, etc..)

d) Coût du combustible et des matières diverses consommées (huile de graissage) qui dépendent de la production de la centrale.

e) Dépenses annuelles de main d'oeuvre et de surveillance et d'administration.

L'ensemble des dépenses divisé par la production escomptée en kWh donne le prix de revient du kWh.

L'ensemble des dépenses annuelles d'exploitation de la centrale peut être divisé en deux parties :

I. Les dépenses indépendantes du nombre de kWh produits par an

II. Les dépenses directement proportionnelles au nombre de kWh produits

Dépenses indépendantes de la produtcion :

1) Intérêts du capital investi

2) Amortissement des machines, du batiment

3) Entretien courant du batiment et des machines (x)

4) Frais administratifs

Dépenses proportionnelles à la production :

1) Combustible

2) Matières de graissage

3) Moyenne des dépenses annuelles d'entretien et de réparation des machines

4) Main d'oeuvre occupée à la production

(x) Les dépenses annuelles de réparation s'élèvent à environ 10% du capital investi dans une centrale électrique et à 5% de celui investi dans une centrale hydraulique.

Appelons :

A les dépenses annuelles indépendantes de la production

B les dépenses annuelles proportionnelles à la production

F les dépenses annuelles totales : A + B

N le nombre de kWh produits par an

P la puissance totale des générateurs en kW

U la durée d'utilisation, soit le quotient : $\frac{N}{P}$

Ce coefficient représente le nombre d'heures de fonctionnement de la centrale pour que celle-ci, fonctionnant à la puissance maximum P fournisse le même nombre N de kWh que celui qui sera débité en fait pendant toute l'année.

L'on a successivement les relations suivantes :

$$F = A + B \qquad N = P \times U$$

Coût du kWh :

$$\frac{F}{N} = \frac{A + B}{N} = \frac{A}{N} + \frac{B}{N}$$

Or le terme A peut être considéré comme le produit P × m c'est-à-dire un terme proportionnel à la puissance installée. Il suffit de diviser le terme A par P pour obtenir la valeur de m.

De même le terme B peut être considéré comme le produit de N par un coefficient unitaire n : B = N × n (x)

En remplaçant N par sa valeur P × U, dans la première fraction, il vient :

$$\text{Coût du kWh} = \frac{F}{N} = \frac{P \times m}{P \times U} + \frac{N \times n}{N} = \frac{m}{U} + n$$

Le coût du kWh se compose de deux parties :

a) une partie constante : le terme n

b) une partie inversément proportionnelle à la durée d'utilisation U

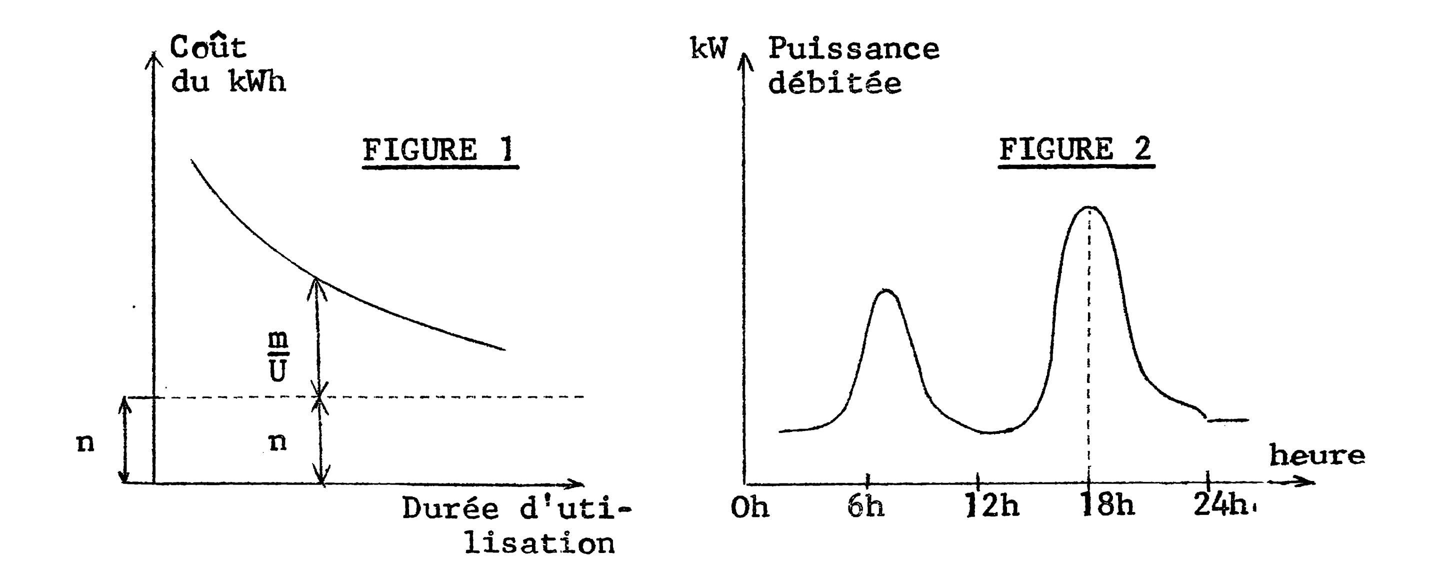
(x) Dans l'hypothèse d'une centrale thermique, n représente la valeur du combustible, des matières de graissage et la partie de la main d'oeuvre dépensées par kWh produit.

La figure 1 montre la variation du coût du kWh en fonction de la durée d'utilisation.

Cette figure montre qu'une centrale fournira le kWh à un prix qui dépend essentiellement de la durée d'utilisation, c'est-à-dire du diagramme de charge.

Les termes m et n sont fonction du type de centrale (thermique, hydraulique, etc ...).

Un diagramme de la puissance débitée comme l'indique la figure 2 est relatif à une centrale dont la durée d'utilisation U est faible ; le terme m/U doit être rendu minimum afin de ne pas grever d'une façon excessive le prix du kWh.



Dans ce cas m sera choisi de façon que le coût d'établissement par kW installé soit le plus faible possible, quitte à sacrifier le rendement et à tolérer une valeur de n un peu plus élevée.

Conclusion :

Si le réseau de distribution offre le kWh à un prix nettement supérieur au prix de revient calculé, il est avantageux de créer une centrale autonome.

Cette dernière ne doit pas être construite si la différence de prix est trop faible car un élément important qui échappe à un calcul d'ordre comptable a été négligé: les soucis de production d'énergie qui absorberont fatalement partiellement

l'attention de la direction de l'entreprise qui aurait pu se consacrer davantage à son objet social si la centrale n'existait pas. De plus, les aléas résultant d'une source d'énergie indépendante ne doivent pas être sous-estimés. Le raccordement au réseau public donne la quasi certitude d'une alimentation sans défaillance grâce au maillage des réseaux et à l'interconnexion des centrales du moins en Europe Occidentale.

On peut évidemment pallier l'inconvénient de l'insécurité de l'alimentation autonome en prévoyant un raccordement de secours au réseau public, mais ceci implique des dépenses nouvelles qui réduisent partiellement l'avantage du faible coût du kWh.

2. DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE :

Dans une grande installation, l'énergie électrique provenant soit de la centrale autonome, soit du réseau de distribution est distribuée par l'intermédiaire d'un réseau de sous stations réparties dans toute l'installation; le réseau se réduit à une seule sous-station dans les installations de moyenne grandeur (500 m à 1000 m de diamètre). Les petites installations qui n'exigent qu'une faible puissance instantanée (moins de 10 kW) sont raccordées directement au réseau basse tension de distribution, du moins en Europe.

3. DISTRIBUTION HAUTE TENSION :

Il est évident qu'une installation de grande surface ne pourrait être desservie à partir d'un point unique : la chute de tension admissible à l'extrémité des câbles doit être limitée à une valeur raisonnable, par exemple 5% ; l'alimentation à partir d'un point unique à basse tension imposerait des sections de câbles prohibitives.

Le choix de l'emplacement et le nombre de sous-station à prévoir doivent être déterminés en considérant les zones de consommation d'énergie et leur importance ; on doit faire un bilan comparé des différentes solutions possibles en tenant compte du prix des câbles à haute tension des sous-stations et des lignes à basse tension.

Il existe deux modes de distribution à haute tension : les divers postes peuvent être reliés par un bouclage (disposition générale) ou être raccordés en étoile à partir d'un point central.

a) Distribution en boucle :

Le schéma de la figure 3 montre une distribution en boucle classique. Le poste A est le point de raccordement au réseau de distribution, on l'appelle également point de fourniture. L'énergie est fournie aux postes secondaires B, C, D, E par l'intermédiaire du réseau de câbles.

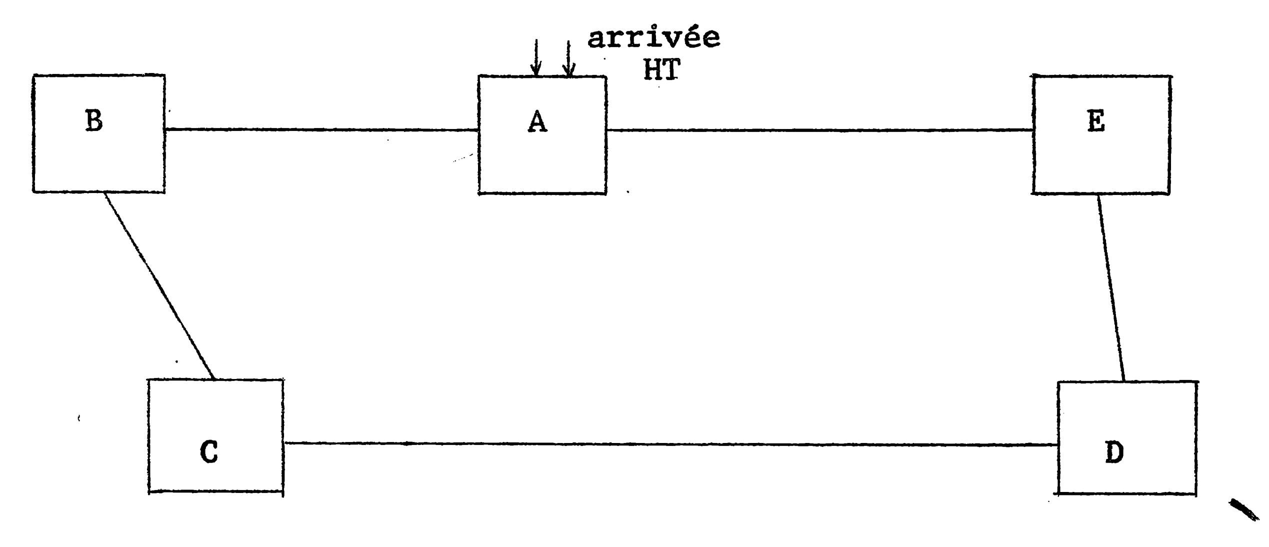


FIGURE 3

Point de fourniture : cette sous-station est légèrement plus compliquée que les suivantes en raison de la nécessité d'assurer la protection des câbles de la boucle.

Le schéma de la figure 4, établi à titre exemplatif, suppose deux arrivées pouvant être mises en parallèle, un dispositif de comptage haute tension de l'énergie consommée par tout le réseau et deux transformateurs de puissance.

Les sectionneurs S_{B1} , S_{B2} sont des sectionneurs de bouclage.

Le disjoncteurs général D protège l'ensemble de l'installation, il doit être placé avant le comptage dont il assure la protection. Il sera précédé du sectionneur général S qui donne une coupure visible et permet ainsi d'effectuer l'entretien de toute la sous-station.

Les disjoncteurs D_3 et D_4 protègent les départs de câble et les disjoncteurs D_1 et D_2 protègent les deux transformateurs.

Les sectionneurs S_3 et S_4 sont pourvus de gâches de mise à la terre afin de permettre grâce à la position "terre" la réparation d'un câble en toute sécurité.

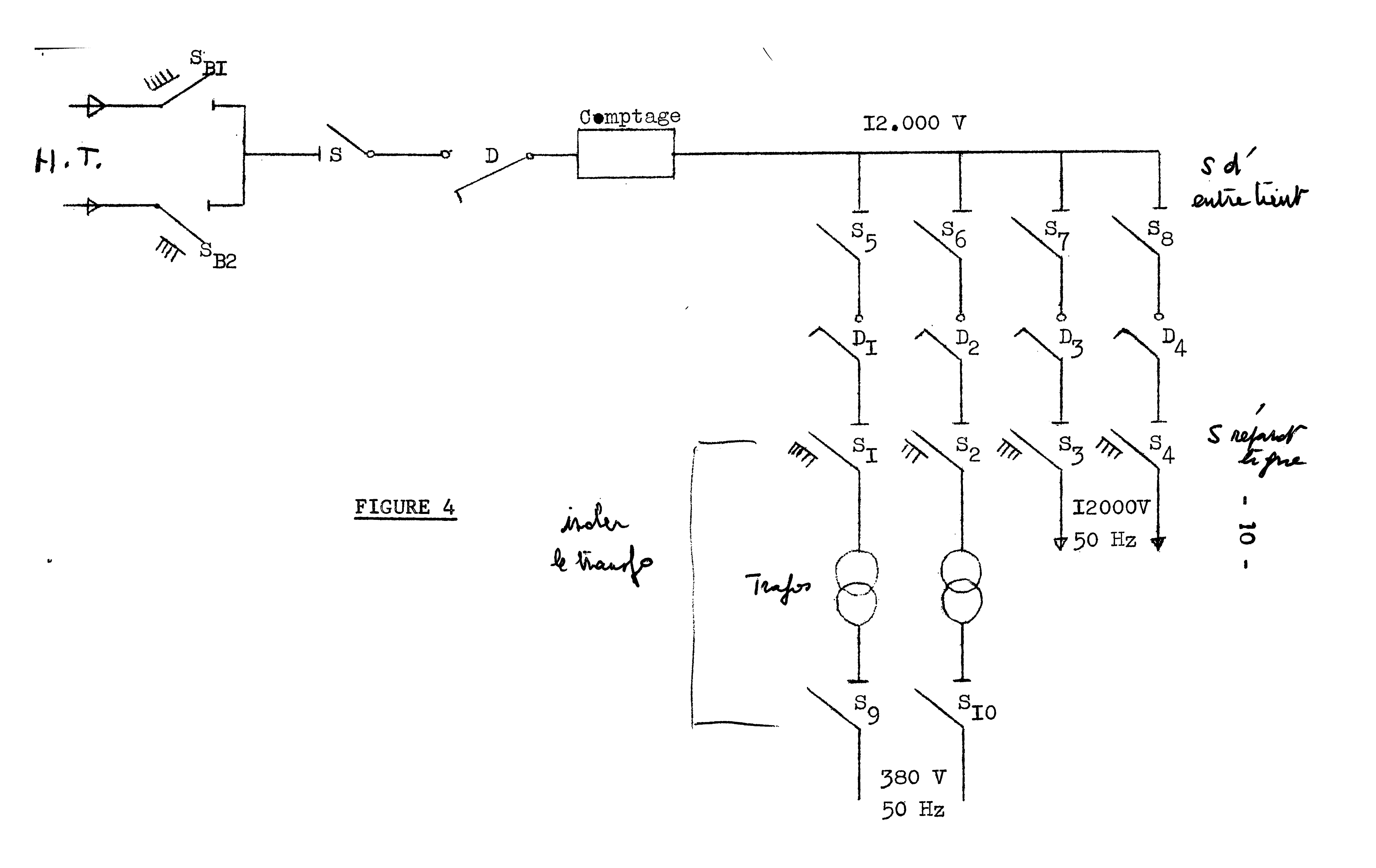

H.T.
S_{BI}
S_{B2}
S
D
Comptage
I2.000 V
S d' entretient
S_5
S_6
S_7
S_8
D_I
D_2
D_3
D_4
S_I
S_2
S_3
S_4
S départ ligne
I2000V
50 Hz
Trafos
isoler le transfo
S_9
S_{IO}
380 V
50 Hz

FIGURE 4

Les sectionneurs S_5 , S_6 , S_7 , S_8 sont placés en amont des disjoncteurs afin de réaliser en cas de nécessité une coupure visible et de permettre l'entretien des disjoncteurs.

Les sectionneurs S_1 et S_2 permettent de mettre à la terre les enroulements HT dont il faut exécuter une visite en toute sécurité. Il va de soi qu'avant de mettre à la terre l'un de ces sectionneurs, il faut au préalable ouvrir le sectionneur HT correspondant placé derrière le transformateur.

Sous-stations secondaires: la figure 5 montre les dispositions à prévoir; le disjoncteur général a disparu, il reste les deux appareils nécessaires pour protéger les transformateurs.

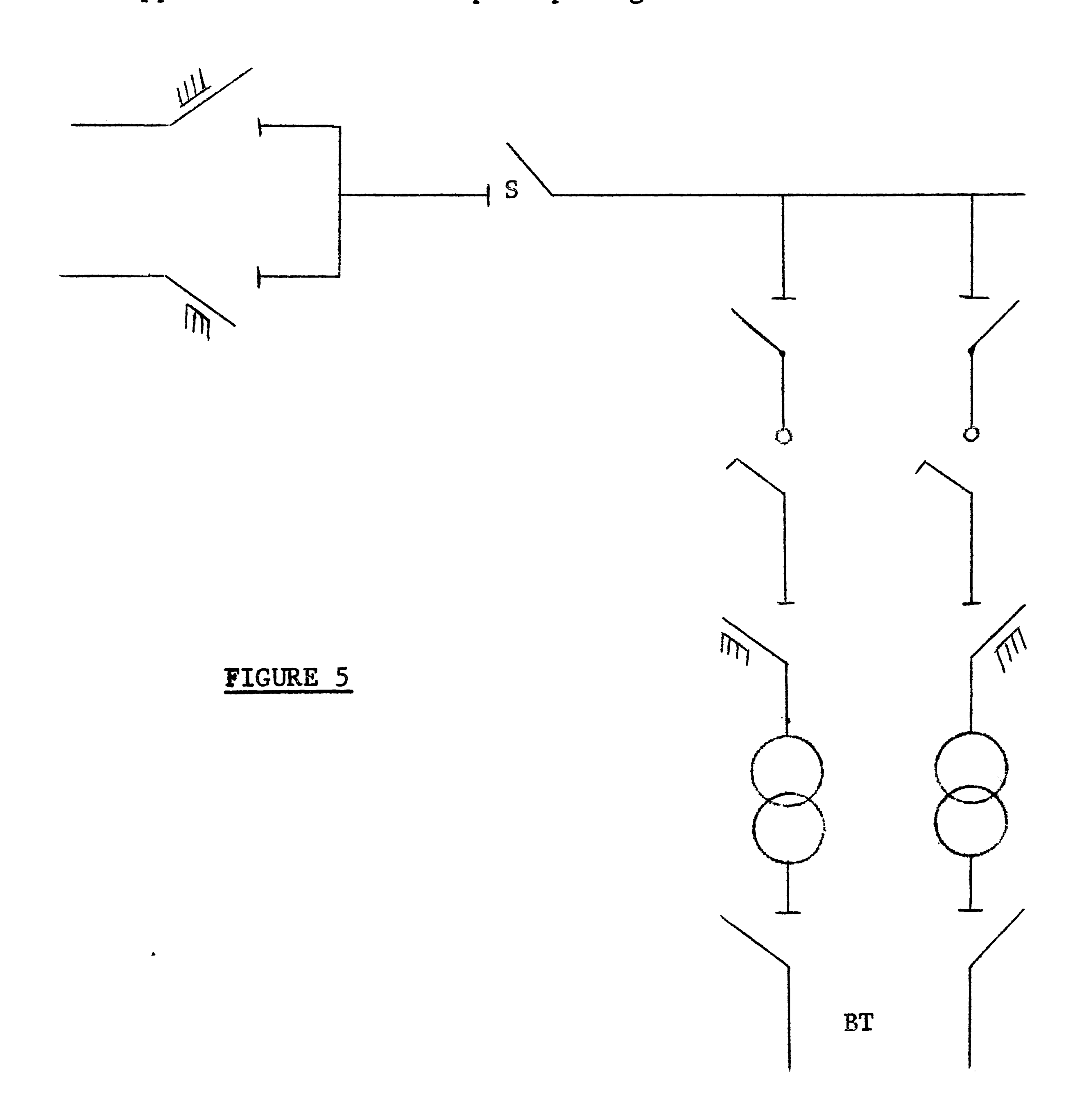
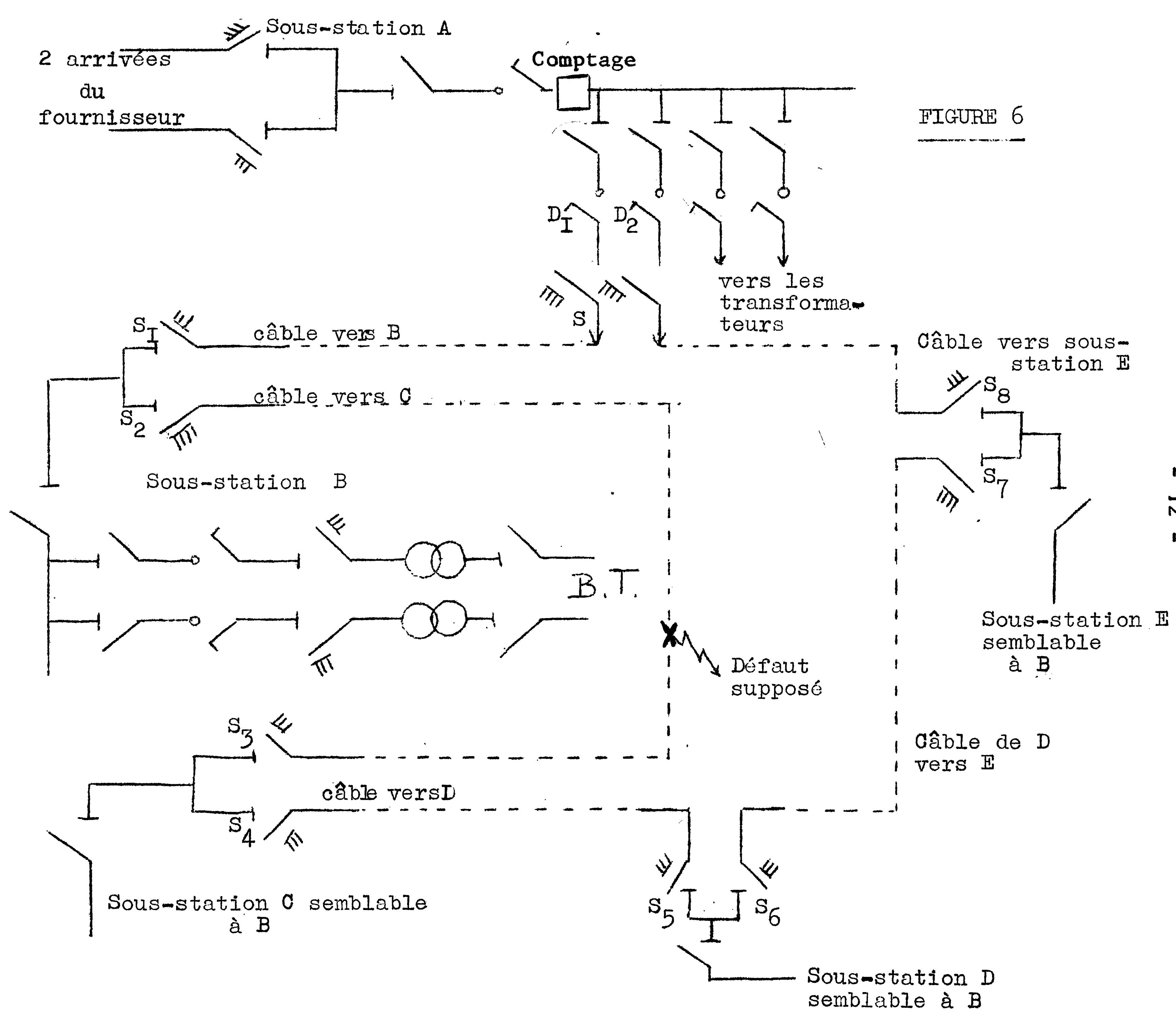


FIGURE 5


Sous-station A
2 arrivées
du
fournisseur
Comptage
FIGURE 6
D1
D2
S
vers les
transformateurs
S1
câble vers B
câble vers C
S2
Sous-station B
B.T.
Câble vers sous-station E
S8
S7
Sous-station E
semblable
à B
Défaut
supposé
S3
câble versD
S4
Câble de D
vers E
Sous-station C semblable
à B
S5
S6
Sous-station D
semblable à B

Exploitation du réseau bouclé :

Le schéma du réseau simplifié est donné à la figure 6.

En principe, tous les sectionneurs du bouclage soit les sectionneurs S_1 à S_8 sont fermés à l'exception d'un seul. Supposons que S_4 soit maintenu ouvert. Le disjoncteur D_1 alimente les sous-stations B et C, le disjoncteur D_2 alimente les sous-stations E et D. Ceci facilite la recherche des défauts et évite de provoquer une panne générale dans tout l'atelier si un défaut de câble survient.

Supposons un défaut de câble sur le tronçon BC. Le disjoncteur D_1 déclenche privant B et C de courant HT. En ouvrant le sectionneur S_1 dans la sous-station B et en réenclenchant D_1, l'on teste le tronçon AB qui dans le cas présent est en bon état. En déclenchant D_1, en refermant S_2 puis en réenclenchant D_1 , l'on fait déclencher le disjoncteur D_1 ce qui localise le défaut sur le tronçon BC (puisque S_4 est resté ouvert).

Pour rétablir le service normal, il faudra faire ouvrir S_2 et S_3, ce qui isole complètement le réseau défectueux, puis réenclencher D_1 ce qui remet B en service. Pour remettre C en service, il faudra déclencher D_2 et refermer S_4 puis réenclencher D_2.

Il ne faut pas perdre de vue que le déclenchement d'un disjoncteur doit être suivi de l'ouverture du sectionneur situés en amont afin d'assurer la sécurité de manoeuvre et que la fermeture d'un disjoncteur doit toujours être précédée de la fermeture du sectionneur placé dans le même circuit, car un sectionneur ne peut ni couper ni fermer un circuit. en charge

Les manoeuvres doivent toujours être commandées par un seul agent qui prend le commandement des opérations. Toute initiative d'une autre personne doit être sévèrement proscrite pour éviter toute catastrophe.

b) Disposition en étoile :

La figure 7 montre le schéma de la disposition "étoile" ; chaque sous-station est raccordée directement au point de fourniture. Cette disposition n'est utilisable que lorsque chaque sous-station ne comprend qu'un seul transformateur*. Le disjoncteur qui protège chaque transformateur peut être placé au point de fourniture, la concentration de tous les disjoncteurs dans un seul poste permet l'utilisation de disjoncteurs à air comprimé. La concentration des appareils facilite l'exécution des manoeuvres. Cette disposition est d'autant plus justifiée que le nombre de sous-stations est plus élevé.

Afin d'accroître la sécurité de l'exploitation, il est indiqué de prévoir deux câbles alimentant chaque sous-station secondaire. L'un des câbles est en service, l'autre est hors tension.

La figure montre également le schéma d'une sous-station secondaire alimentée par un seul câble.

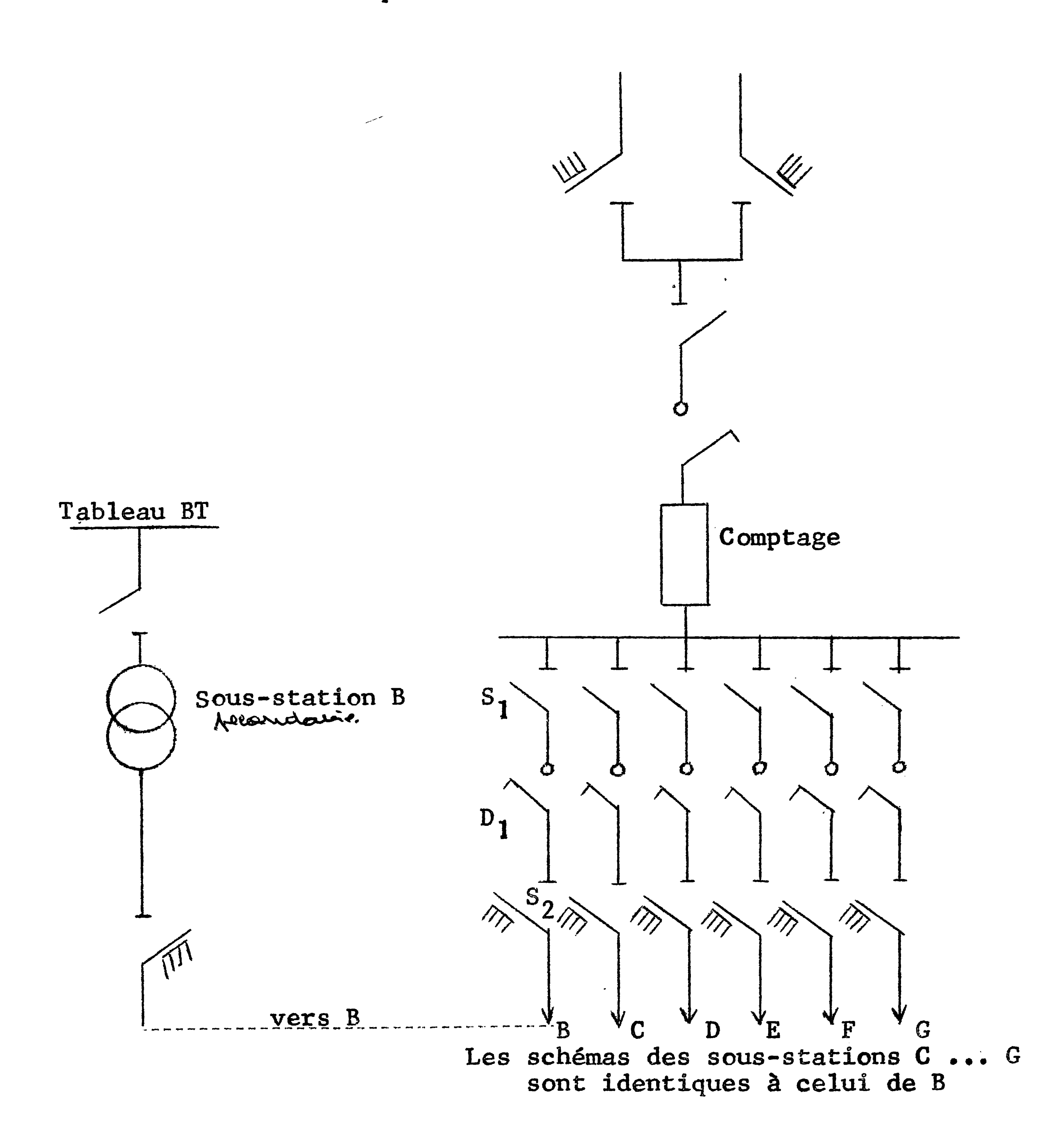


FIGURE 7

La figure 8 montre le schéma à utiliser quand on fait usage de deux câbles.

La figure reproduit seulement la tranche S_1 ,D_1 S_2 et la sous-station B.

Les sectionneurs S_2 et S_4 seront fermés; les sectionneurs S_3 et S_5 seront ouverts.

Si un défaut survient sur le câble en service, il suffit d'ouvrir S_2 et S_4 puis de refermer S_3 et S_5 et le disjoncteur D_1 correspondant.

Les sous-stations secondaires ne disposent pas d'agent en permanence tandis que le point de fourniture sera souvent installé au voisinage immédiat de l'atelier des électriciens.

<u>Remarque</u> :

Le sectionneur S_T n'est pas indispensable. En effet, l'ouverture du disjoncteur D_1 et des sectionneurs S_4 et S_5 suffit à mettre l'appareil hors service dans la sous-station B.

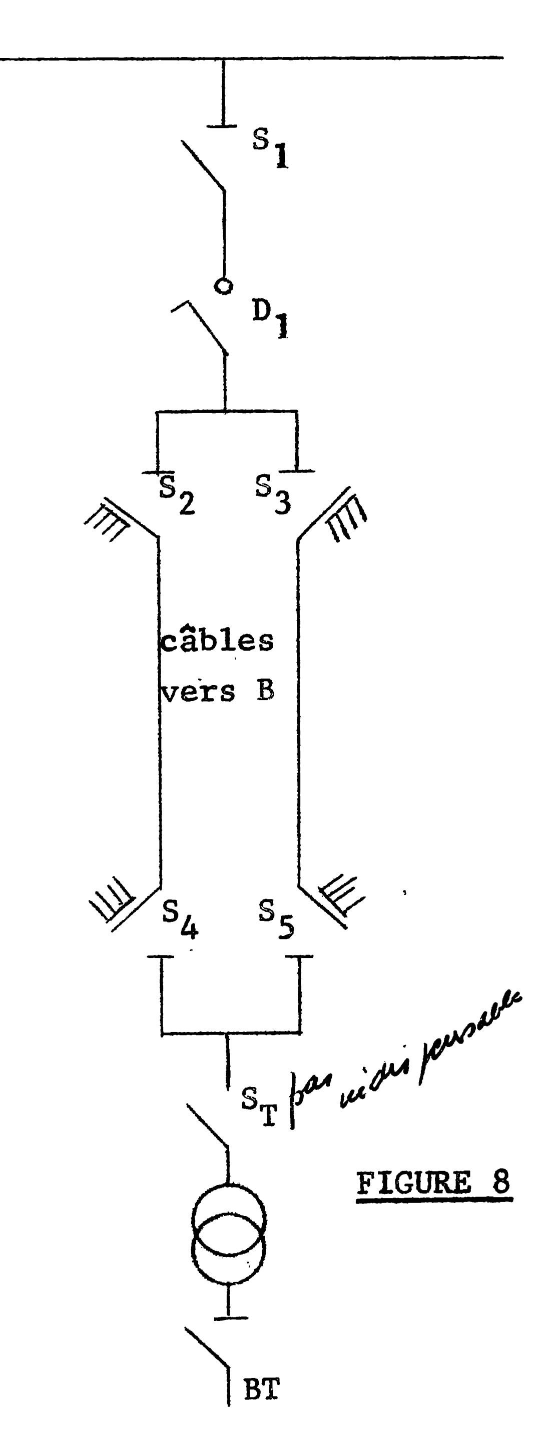


FIGURE 8

4. PUISSANCE ET NOMBRE DE TRANSFORMATEURS :

Le nombre de transformateurs à prévoir est fonction du genre d'activité de l'installation.

La puissance apparente totale du ou des transformateurs doit être choisie en estimant la puissance apparente consommée par les divers circuits. Si on ne dispose d'aucune donnée pratique, on peut estimer la puissance de la sous-station à 35 ou

40% de la puissance totale des engins consommateurs. L'installation de batteries de condensateurs permet de réduire la puissance apparente des transformateurs.

Il s'indique d'installer plusieurs transformateurs dans les cas suivants :

1) La puissance consommée est très variable, par exemple l'énergie consommée pendant la nuit est très faible.

On peut alors prévoir deux transformateurs :

- Un appareil puissant utilisé pendant les heures durant lesquelles l'énergie conommée est importante
- Un appareil de faible puissance utilisé seulement durant les heures de faible activité

Un seul disjoncteur peut être utilisé pour la protection des deux appareils à condition d'utiliser un inverseur (figure 9)

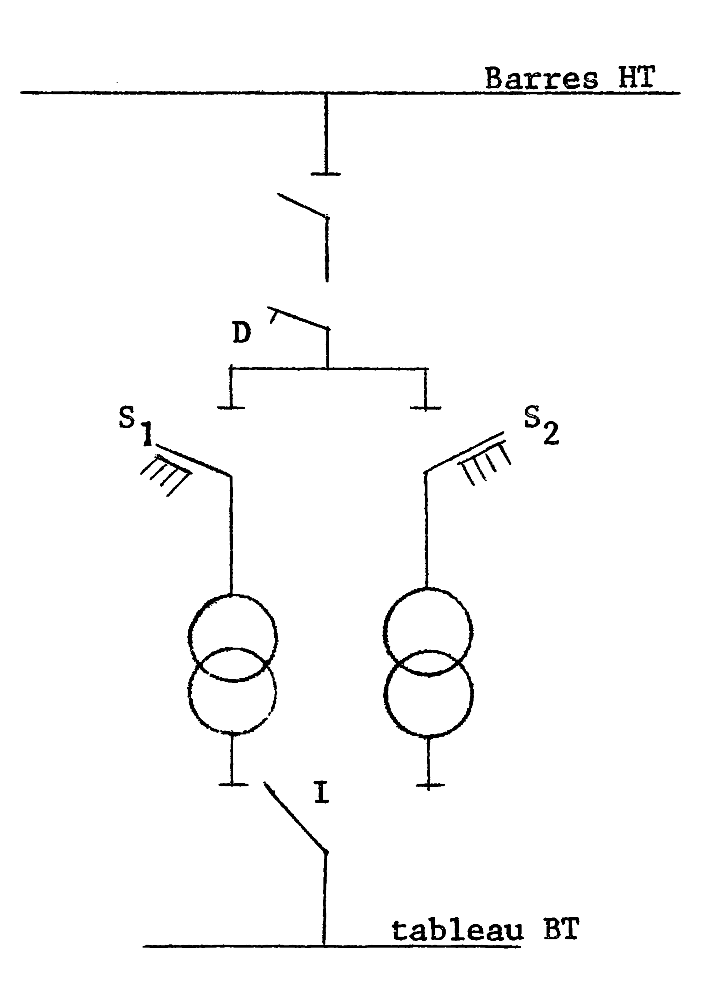


FIGURE 9

Remarques:

a) Ce schéma est également valable dans la distribution étoile car il n'y a qu'un seul transformateur en service par sous-station secondaire.*

b) Cette disposition est intéressante lorsque la différence entre les pertes à vide des deux transformateurs est élevée. L'intérêt augmente avec le coût du kWh et la pénalisation pour mauvais cos φ (le cos φ aux faibles charges est évidemment très faible en raison de l'importance relative des pertes à vide).

2) L'installation desservie par la sous-station est vitale, par exemple, l'éclairage dans une grande gare. On installe dans ce cas deux transformateurs identiques connectés également comme l'indique la figure 9 de façon que le remplacement d'un transformateur en service par l'appareil de réserve puisse se faire en un temps extrêmement réduit: ouverture du disjoncteur D, ouverture d'un sectionneur S, fermeture de l'autre sectionneur et renversement de la position de l'inverseur I.

On peut même prévoir un appareillage réalisant automatiquement le remplacement d'un transformateur par l'appareil de réserve pour réduire à un temps imperceptible la durée de commutation.

3) On peut aussi fractionner la puissance des transformateurs quand on désire assurer l'alimentation de certains circuits vitaux ou que l'on veut disposer de réserves prêtes à fonctionner.

Lors d'un défaut sur un transformateur, on laisse en service uniquement les installations vitales au détriment des installations secondaires ou l'on met en service l'appareil de réserve.

Remarques importantes :

I. Si l'on désire réduire les investissements au minimum, l'on peut ne prévoir qu'un seul transformateur par sous-station plus un seul appareil de réserve pour tout le réseau à condition de prévoir à l'avance le transport rapide et le raccordement de l'appareil de réserve dans une sous-station quelconque. Lors de l'établissement des sous-stations, il est aisé de prendre les dispositions nécessaires. Ceci est cependant inadmissible lorsque le service n'admet pas d'interruption d'une durée assez longue.

II. Lorsqu'on prévoit l'installation de plusieurs transformateurs, il faut veiller à ce que, du point de vue constructif, ils puissent être mis en parallèle. En pratique, des transformateurs de puissance trop différente, par exemple, dont le rapport

des puissances dépasse 3/1 ne peuvent être mis en parallèles.

III. Lorsqu'on fait usage de sous-stations équipées d'un seul transformateur ou de deux transformateurs ne pouvant être mis en parallèle (cas de la figure 9), il est avantageux de prévoir que le transformateur de réserve soit du type à pertes normales et non du type à pertes réduites ou extra-réduites.

La différence de prix est appréciable et dans le cas actuel, la différence de rendement peut être négligée puisque le transformateur de réserve sera en fait utilisé peu d'heures par an.

Pour ce qui concerne le transformateur en service normal, il est souvent avantageux comme le montre un calcul simple d'acquérir un transformateur à pertes très réduites. L'intérêt de cette acquisition sera évidemment d'autant plus important que le coût du kWh est plus élevé.

Il se peut que dans l'hypothèse d'un prix unitaire du kWh particulièrement favorable, il n'y ait aucun intérêt à acheter un appareil plus coûteux.

5. TABLEAU DE REPARTITION BASSE TENSION :

Sauf dans des cas spéciaux, moteurs très puissants, il est avantageux de distribuer l'énergie à 220 ou 380 V. De toute façon les petits moteurs sont uniquement construits pour la basse tension, il en est de même des appareils d'éclairage.

Les transformateurs alimentent les divers feeders par l'intermédiaire d'un tableau de répartition. Les tableaux les plus économiques sont du type "matière moulée", ils conviennent dans la plupart des cas.

Le nombre de départs à prévoir dépend essentiellement des circonstances locales. Il est conseillé de prévoir un départ au moins pour l'alimentation des postes de soudure monophasés afin de soustraire les câbles de force motrice à de trop larges variations de tension. Pour des raisons identiques, les circuits d'éclairage seront indépendants.

La protection des circuits peut être réalisée par fusibles ou par disjoncteurs, ces derniers sont utilisés pour des intensités nominales élevées. On utilise aussi des fusibles à haut pouvoir de coupure lorsque le ou les transfos d'alimentation sont puissants.

6. SECTION DES FEEDERS :

Lors du choix de la section d'un feeder, il faut tenir compte des deux conditions suivantes :

a) la densité de courant dans les câbles ne doit pas dépasser la valeur prévue par le fabricant (x)

b) la chute de tension admissible ne doit pas dépasser 5% de la tension au départ.

Lors des calculs l'on déterminera la valeur maximum probable du courant en supputant les chances de fonctionnement simultané des différents engins.

MISE EN PARALLELE DES SOUS-STATIONS

Alors que pour des raisons évidentes les sous-stations des réseaux de distribution urbains sont raccordées en parallèle, il parait moins recommandé de faire fonctionner en parallèle les sous-stations d'une même installation industrielle.

En effet, dans un même batiment, il est avantageux de bien séparer les diverses sources de courant lorsque l'on considère la sécurité des agents qui doivent intervenir à l'occasion d'un dérangement.

Il va de soi que ce principe n'est pas d'application rigoureuse, par exemple dans le cas d'une installation de pompes alimentant un circuit de refroidissement de tuyères, le courant nécessaire pour les groupes moto-pompes pourra être fourni par deux sous-stations distinctes.

Le principe général est énoncé plutôt en vue de la sécurité des agents chargés de l'entretien des installations. Ce personnel doit pouvoir couper sans hésitation ni erreur la source de tension qui alimente une installation déterminée.

Par contre, il est parfois indiqué de prévoir un feeder de mise en parallèle des divers feeders basse tension. Un exemple le montre aisément : considérons un batiment de trois cents mètres sur 250 m (figure 10) ; une série de 4 feeders parallèles à la longueur du batiment alimente 4 tableaux divisionnaires, chacun de ceux-ci alimente à son tour 3 sous-feeders perpendiculairement à la direction des feeders. Chacune des 12 travées

---

(x) Il va de soi qu'une surintensité importante mais passagère (ordre du 1/4 h, par exemple), n'est pas dandereuse en égard à la constante de temps des câbles.

de l'atelier dispose de l'énergie fournie par un seul sous-feeder, ce qui peut être insuffisant. Si l'on ignore comment l'atelier sera exploité et si l'on veut faire face économiquement à toute éventualité, l'on disposera un feeder de mise en parallèle qui sera installé parallèlement aux 4 feeders à l'opposé de ceux-ci. Ce feeder sera relié aux 12 sous-feeders par l'intermédiaire d'interrupteurs et de fusibles, il permettra à plusieurs travées de disposer d'une puissance double à la condition que la puissance totale ne soit pas dépassée.

La figure 10 représente une disposition de l'espèce. Le feeder de mise en parallèle peut soulager plusieurs sous-feeders simultanément.

Remarques :

Il faut noter la disposition relative des fusibles et des interrupteurs.

1) Les fusibles sont toujours placés en aval du sectionneur de façon à en permettre le remplacement quand le boitier des fusibles est hors tension (par ouverture du sectionneur). Le remplacement d'un fusible sans l'application de cette précaution a déjà entraîné nombre d'accidents par l'explosion du fusible dans les mains de l'opérateur qui n'a pas au préalable levé le défaut.

2) Un tableau divisionnaire est précédé d'un interrupteur. Les fusibles ne sont pas nécessaires. Ils feraient double emploi avec ceux placés en amont, qui protègent le câble contre tout défaut permanent. Ce sont les fusibles d'amont qui sont nécessaires et non ceux placés en aval (figure 10).

FEEDERS POUR POSTE DE SOUDURE MONOPHASE

Les postes de soudure monophasés provoquent un déséquilibre du réseau qui charge inégalement les enroulements des transformateurs ce qui peut occasionner le déclenchement du disjoncteur de protection dont l'un des relais est trop sollicité.

Si le nombre de postes est peu élevé l'on peut se résigner à cet inconvénient qui est d'autant plus gênant que le nombre d'appareils est plus important.

Si la charge de soudure est bien répartie d'une façon constante dans l'atelier, il est possible de disposer les feeders de façon que chaque feeder bifilaire soit chargé de façon uniforme.

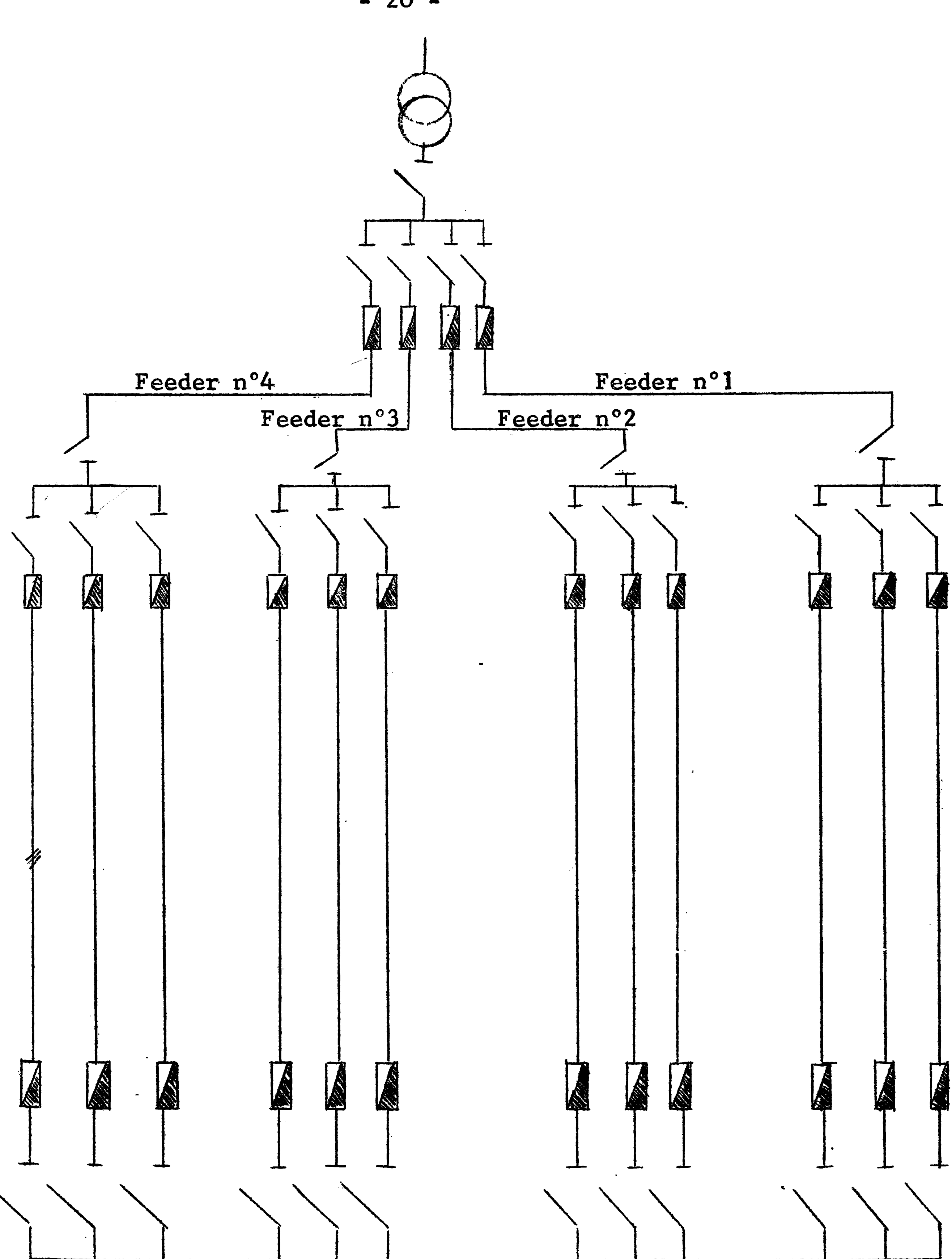


FIGURE 10

Si les postes de soudure sont nombreux et que leur emplacement varie constamment, ce qui est souvent le cas dans les ateliers de réparation, il faut prévoir une disposition plus coûteuse. Les feeders seront tous triphasés et chaque prise de courant sera raccordée aux trois phases. Les postes par contre seront répartis en trois groupes caractérisés par la position des broches de la fiche.

Les fiches du premier groupe permettront le raccordement sur les phases 1 et 2, celles du second groupe raccordent les postes entre les phases 1 et 3, celles du dernier groupe entre les phases 2 et 3. De cette façon, quel que soit l'emplacement des postes de soudure, la charge du réseau sera raisonnablement équilibrée.

7. CAS PARTICULIER DE L'INDUSTRIE METALLURGIQUE :

Dans l'industrie métallurgique, l'on dispose d'une énergie de très faible valeur spécifique en très grande abondance : le gaz de haut-fourneau.

Par tonne de fonte produite, l'on peut récupérer 3000 à 4000 m^3 de gaz de valeur calorifique faible 800 à 1000 kilocalories au m^3. Ce gaz peut être brulé dans des chaudières ou après dépoussiérage alimenter une batterie de moteurs à gaz.

L'énergie ainsi produite est d'un prix de revient très faible car un gaz aussi pauvre est impropre à la distribution urbaine qui exige un pouvoir calorifique de 4000 kilocalories.

Une autre source d'énergie en métallurgie consiste dans les gaz de fours à coke, qui eux sont très riches mais dont la distribution dans le réseau urbain n'est pas toujours possible faute de clientèle suffisante.

Les usines métallurgiques ont dont un intérêt évident à établir une centrale autonome où le coût du kWh sera très faible, il faut toutefois noter que pour éviter les conséquences désastreuses d'une panne dans la fourniture d'énergie électrique le réseau de l'usine devra être raccordé au réseau public qui fournira la réserve.

La centrale sera donc mise en parallèle avec le réseau public afin que la substitution de fourniture de courant puisse se faire sans incident.

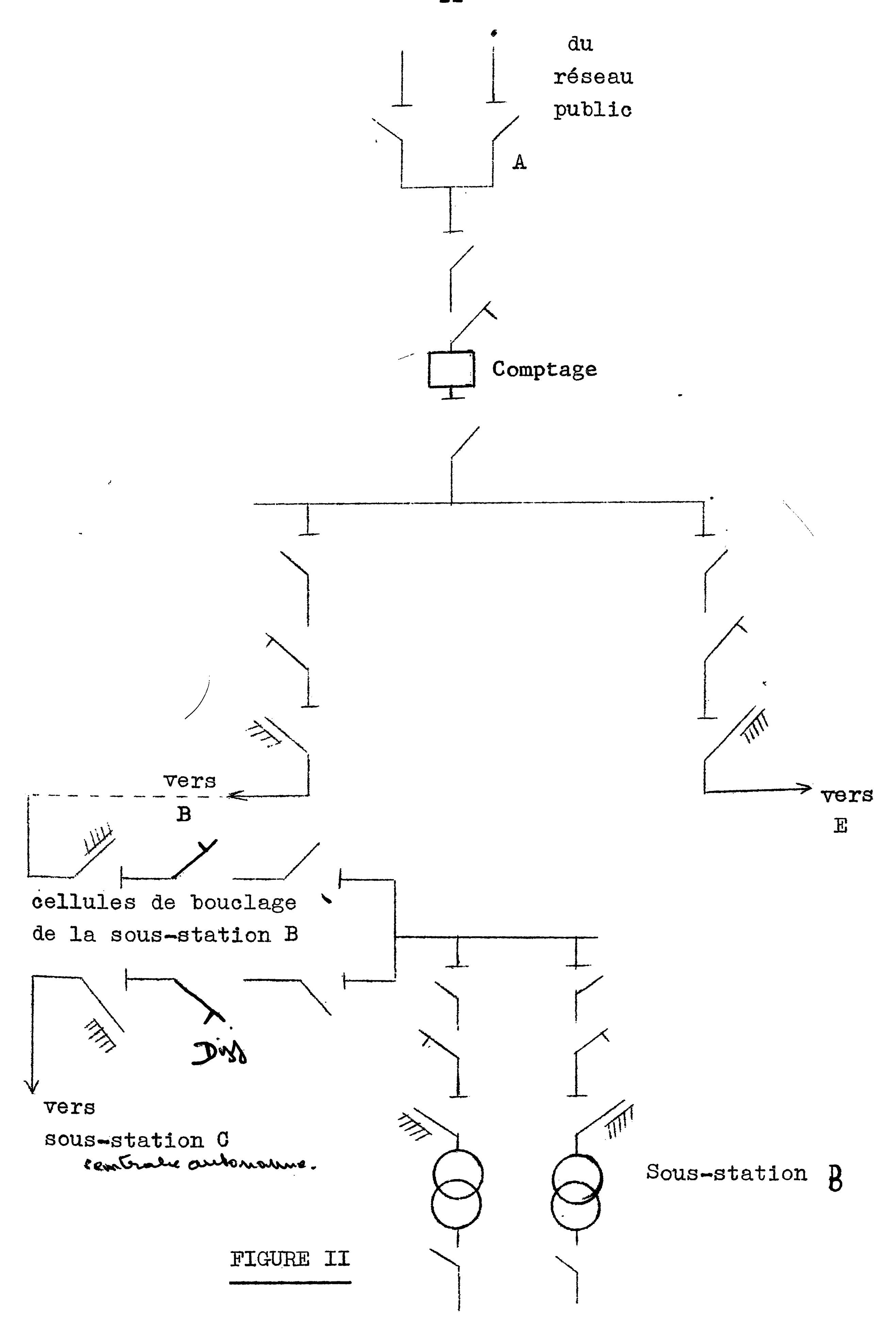

du
réseau
public
A
Comptage
vers
B
vers
E
cellules de bouclage
de la sous-station B
vers
sous-station C
Sous-station B

FIGURE II

Le schéma de distribution est également un peu plus compliqué :

a) Des disjoncteurs de bouclage seront utilisés afin de permettre l'élimination immédiate d'un tronçon défectueux et de rétablir l'alimentation de tous les postes HT.

La figure 11 montre comment le schéma d'une sous-station est transformé.

En résumé dans chaque branchement de bouclage, il y a un sectionneur avec gâches de mise à la terre, un disjoncteur et un sectionneur au lieu d'un seul sectionneur avec gâches de mise à la terre.

Les départs de la sous-station A (réseau public) sont classiques. Les départs de la sous-station C qui est en même temps la centrale autonome sont identiques à ceux de A.

b) Les installations vitales : moteurs de pompes de refroidissement de haut fourneau, par exemple, sont alimentées soit par deux câbles différents provenant de deux sous-stations différentes soit par un câble et un groupe électrogène de secours mis en marche automatiquement en cas de disparition de la tension sur le câble.

(Le refroidissement des tuyères d'un haut fourneau ne peut être suspendu plus de trois minutes sans conséquence grave).

Importance de la consommation d'énergie en métallurgie

Par tonne de coke produite, une cokerie consomme 17 kWh

Par tonne de fonte produite, un haut fourneau consomme 10 kWh

Par tonne d'acier produite un four à réverbère consomme 8 kWh

Par tonne d'acier un laminoir à blooms consomme 20 à 25 kWh

Par tonne d'acier, un laminoir dégrossisseur à chaud consomme 80 à 100 kWh

Par tonne d'acier, un laminoir à barres consomme 60 à 80 kWh

Par tonne d'acier, un laminoir à profilés consomme 30 à 60 kWh

La puissance d'un laminoir dégrossisseur est de l'ordre de 8000 à 10000 CV

La puissance d'un laminoir à chaud 12000 à 20000 CV

La puissance d'un laminoir tandem 15000 à 25000 CV

La puissance d'un laminoir à barres 5000 à 10000 CV

8. CAS PARTICULIER D'UNE SOUS-STATION DE PETITE PUISSANCE :

La norme belge NBN 449 a défini le schéma, la disposition et les dimensions d'une sous-station pour abonnés établie à l'intérieur d'un batiment équipée d'un transformateur de puissance unique dont la puissance apparente ne dépasse pas 500 kVA à condition que la tension d'alimentation ne dépasse pas 20 kV entre phases.

Cette norme peut évidemment servir de base à l'établissement d'une sous-station à usage industriel.

Le schéma unifilaire est repris à la figure 12, tandis que les figures 13 et 14 donnent respectivement la vue en élévation et en plan. Cette dernière donne les cotes du local à prévoir.

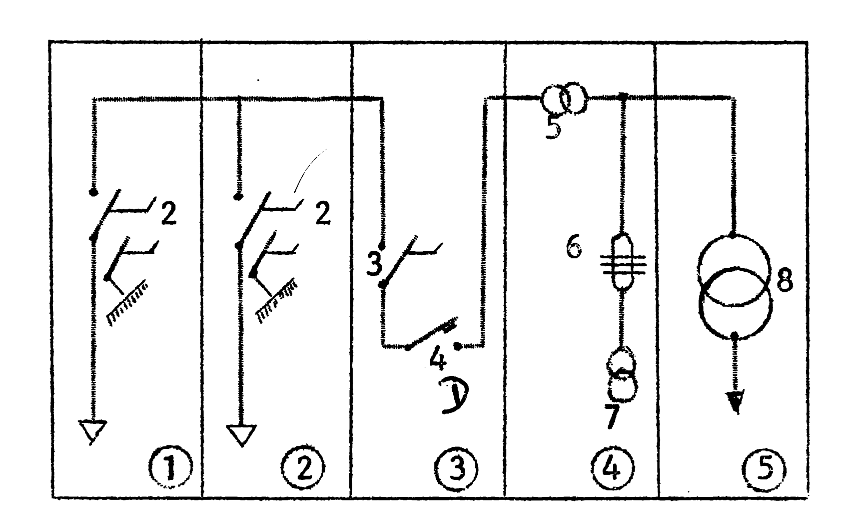


FIGURE 12

Légende des figures 12 à 14

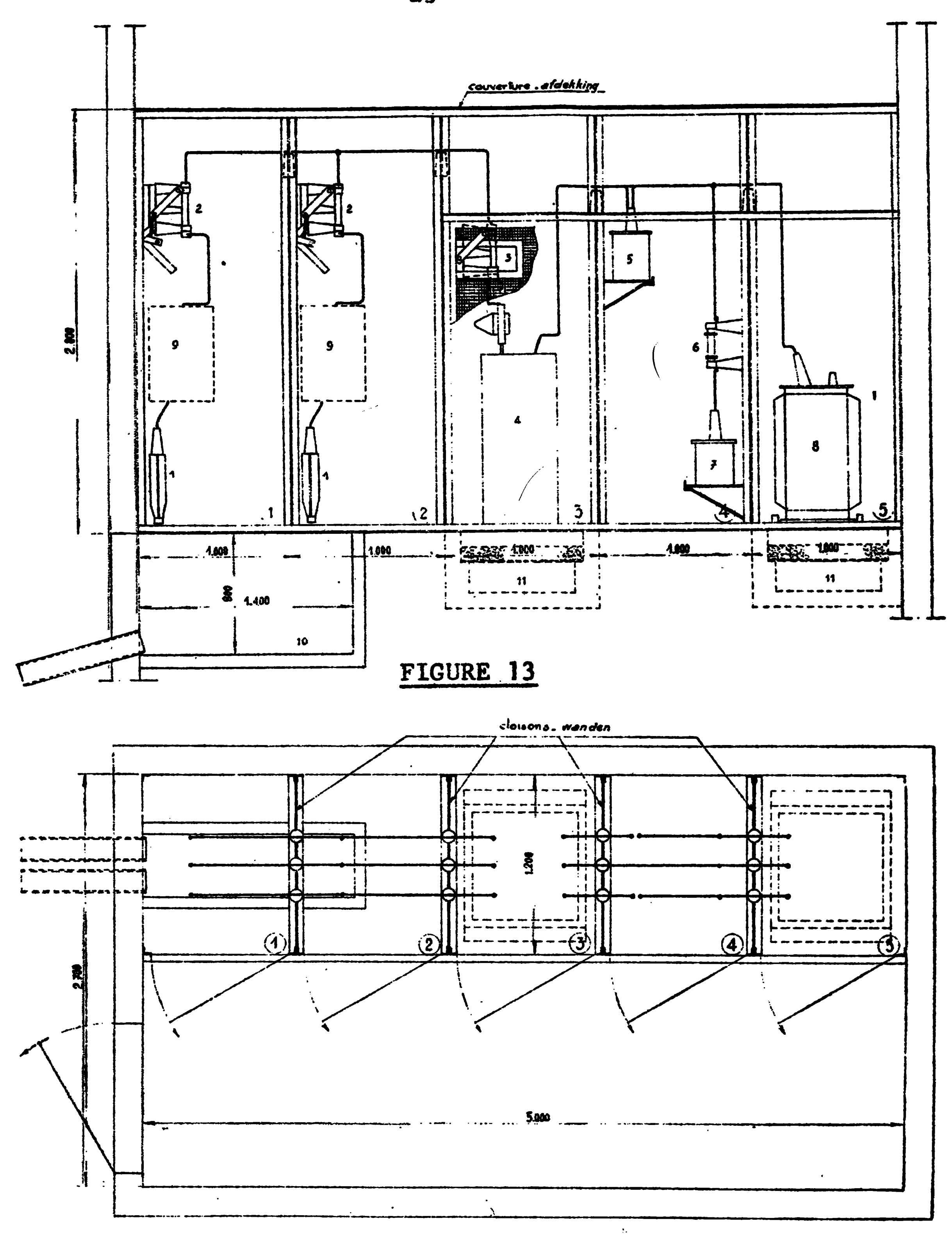


FIGURE 13

FIGURE 14

Remarque: La fosse à huile sous le disjoncteur ne doit être présente que dans l'hypothèse d'un disjoncteur à bain d'huile; celle sous le transformateur de puissance que dans le cas d'un transformateur avec bain d'huile.

9. MISE A LA TERRE :

a) Prescriptions légales pour les sous-stations

Les prescriptions légales belges imposent dans les sous-stations au moins deux réseaux distincts de prise de terre.

1) Un premier circuit appelé terre haute tension comprend une prise de terre raccordée à la masse des ferrures supportant des pièces sous haute tension, les cuves des disjoncteurs, transformateurs et une borne du secondaire des transformateurs de mesure.

2) Un second circuit, appelé terre basse tension, entièrement distinct du premier dont la prise de terre sera distante de la précédente d'au moins 3m, reliera les parties métalliques des tableaux BT qui ne sont normalement pas sous tension.

   Au second circuit peut être connecté le neutre des enroulements BT des transformateurs de puissance (réseau avec neutre à la terre).

   Si le neutre des enroulements BT n'est pas mis à ce réseau de terre BT, il sera raccordé à un troisième réseau de terre dénommé "terre-éclateur" car ce circuit de terre sera connecté au point neutre BT du transformateur par l'intermédiaire d'un éclateur composé de deux électrodes métalliques et d'un isolant capable de supporter la basse tension mais incapable de supporter la haute tension résultant d'un percement dans le transformateur entre enroulements HT et BT.

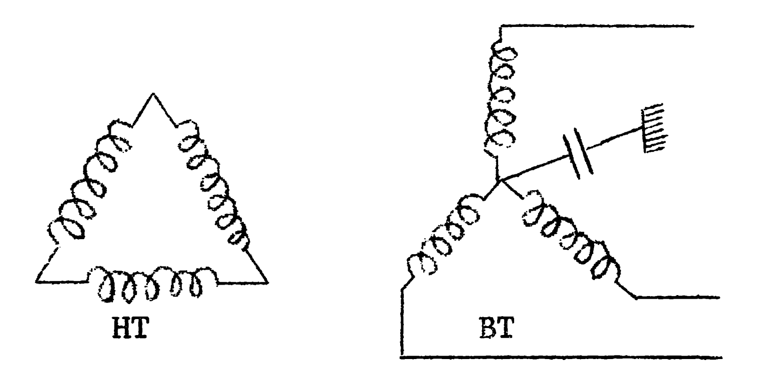


FIGURE 15

La résistance des prises de terre sera faible, il est conseillé de ne pas dépasser 10 ohms. Il est avantageux de prendre pour terre basse tension la prise dont la résistance est la plus faible.

La séparation des réseaux de prise de terre est justifiée par la considération suivante : supposons une interruption dans le câble de raccordement de la terre haute tension et une avarie à l'un des isolateurs HT, une tension élevée peut se propager depuis la ferrure support de l'isolateur au circuit de terre et de là vers la masse accessible des tableaux basse tension apparemment sans aucun danger.

Lorsque la sous-station est alimentée par une ligne aérienne, les parafoudres sont reliés à une prise de terre spéciale appelée terre atmosphérique, distincte des précédentes afin d'éviter qu'un second coup de foudre succédant au premier qui aurait avarié la prise de terre ne prive de toute mise à la terre l'ensemble de l'installation.

b) Mise à la terre des installations basse tension

Selon les prescriptions légales la masse des boitiers métalliques ou des coffrets d'appareils de puissance supérieure à 1 kW, doit être mise à la terre.

En fait le danger d'électrocution ne dépend pas de la puissance de l'engin. Il faut donc mettre à la terre toutes les pièces métalliques qui ne sont pas habituellement sous tension comme les carcasses de moteurs, coffrets, prise de courant, interrupteurs, etc .

Toutes ces pièces avantageusement reliées à un conducteur spécial (le quatrième fil s'il sagit d'un réseau triphasé, le troisième q'il s'agit d'un réseau monophasé: soudure) qui les connecte à la masse des tableaux BT de distribution ainsi qu'à la prise de terre basse tension de la sous-station.

Si on n'utilise pas de terre éclateur, le point neutre BT des transformateurs est relié à ce réseau de terre. Le conducteur de terre ne peut être utilisé comme conducteur d'énergie.

Si l'ossature du batiment est constituée de colonnes métalliques supportant la toiture, le fait de fixer tous les coffrets métalliques aux colonnes constitue une mise à la terre supplémentaire de toute sécurité car une colonne métallique dont le pied est cependant noyé dans un massif de béton constitue une prise de terre indestructible quoique de valeur ohmique quelconque, la mise en parallèle d'une série de colonnes permet toutefois d'obtenir une mise à la terre très efficace dont la résistance est souvent inférieure à un ohm. On peut également se servir de canalisation métallique d'adduction d'eau à la condition de shunter les compteurs d'eau éventuels.

Si on ne dispose d'aucune mise à la terre auxiliaire citée ci-dessus, il est prudent d'établir dans chaque batiment une seconde électrode de terre qui sera située à grande distance de la première. Les deux prises de terre sont situées par exemple sur une diagonale du batiment.

Remarque : Le fait de mettre à la terre le neutre du réseau obligera le service d'entretien à maintenir en excellent état l'isolation des canalisations. De plus, la recherche d'un défaut éventuel sera facilitée.

10. CHOIX DU TYPE DE CANALISATION :

Il ne sera fait usage en haute tension que de câbles armés soigneusement protégés mécaniquement, pour des raisons de sécurité.

A l'extérieur des batiments, pour les réseaux à basse tension, l'on peut faire usage de lignes aériennes nues; mais à l'intérieur des ateliers, l'on fera usage de canalisations isolées du type C.O.B. ou C.R.B. sur isolateurs ou en tubes d'acier isolant ou non-isolant suivant la tension.

On peut utiliser les câbles C.H.A.B. ou C.H.B. ou des câbles avec isolation en polyvinyle lorsque l'ambiance rongerait trop rapidement les canalisations ordinaires. Si de nombreuses canalisations doivent être placées, l'on fera usage de petites étagères fixées aux murs ou à la charpente de la toiture pour y déposer les câbles isolés.

Un dispositif très simple mais très coûteux est représenté aux figures 16 et suivantes. Il est constitué d'une gaine contenant, fixés sur des isolateurs, les conducteurs électriques. Les plaques amovibles permettent la fixation des organes de dérivation.

Ce système coûteux est vendu en Belgique par :

- les Anciens Etablissements Rosengarde à Bruxelles
- la Télémécanique Belge à Bruxelles
- les Etablissements Klöckner-Möller de Bonn

La figure 17 montre l'installation dans un hall de machines-outils.

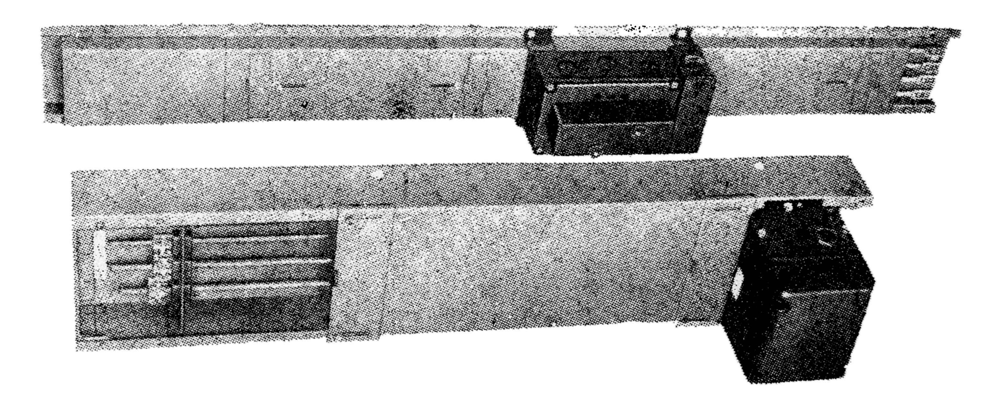


FIGURE 16

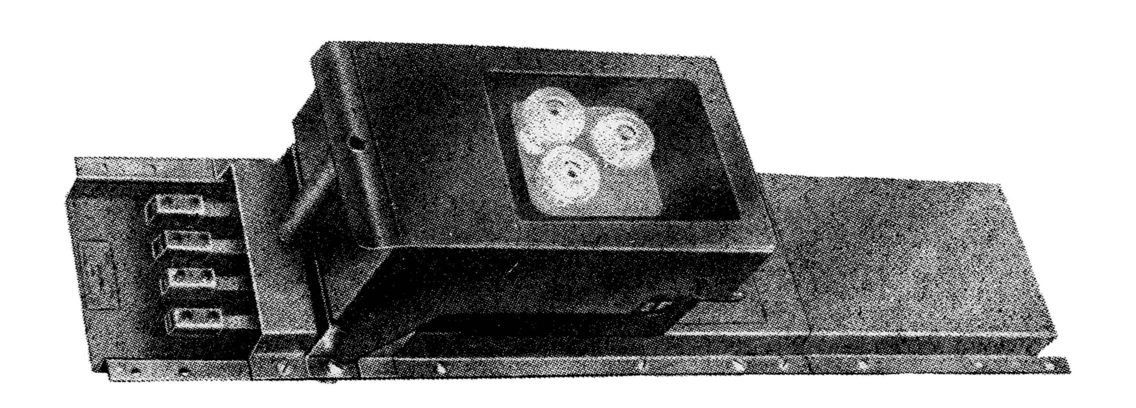


FIGURE I7

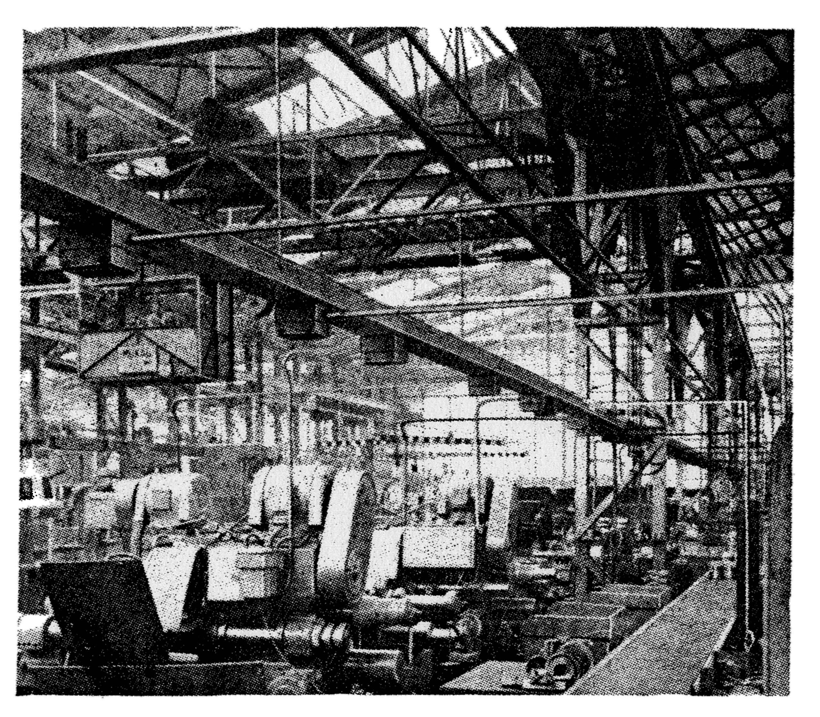


FIGURE 18

11. PROTECTION MECANIQUE DES MOTEURS ET DE L'APPAREILLAGE :

La norme N.B.N. 197 de l'Institut Belge de Normalisation définit le degré de protection des machines, transformateurs et appareils électriques.

La protection est définie par la lettre P suivie d'un nombre de deux chiffres. Exemple : P 33.

Le chiffre 1 signifie que les corps solides dont la plus petite dimension excède 50 mm ne peuvent pénétrer et que le contact avec une grande surface de corps humain par exemple la surface de la peau d'une main est impossible.

Le chiffre 2 signifie que les corps solides dont la plus petite dimension excède 12 mm ne peuvent pénétrer et qu'il est impossible de toucher du doigt les pièces dont le contact présente un danger.

Le chiffre 3 signifie que les corps solides dont la plus petite dimension excède 1 mm ne peuvent pénétrer.

Le chiffre 4 signifie qu'il a été prévu une protection contre les dépots nuisibles de poussière. La pénétration de la poussière n'est pas empêchée mais la poussière ne peut se déposer en des endroits où elle risquerait d'être nuisible au bon fonctionnement de l'engin.

Le chiffre 5 exprime que la protection complète contre les poussières est assurée. Toutefois l'étanchéité à l'air n'est pas assurée et l'appareil peut "respirer".

Le second chiffre indique le degré de protection contre l'introduction d'eau :

Le chiffre 0 indique l'absence de protection.

Le chiffre 1 indique que l'appareil est protégé contre la chute de gouttes d'eau tombant verticalement.

Le chiffre 2 indique que l'appareil est protégé contre les gouttes d'eau ou les filets d'eau tombant verticalement ou obliquement sous un angle inférieur ou égal à 60° sous faible pression.

Le chiffre 3 définit le mode de protection identique au précédent en prévoyant en outre que l'eau peut être projetée de toutes parts (même par en dessous)

Le chiffre 4 indique qu'il a été fait usage d'un joint étanche à l'humidité (projections et vapeur d'eau). Ce joint répond également à la spécification 4 relative à l'introduction de solides.

Le chiffre 5 exprime que les interstices, les joints et les traversées doivent être étanches. Les joints, couvercles, etc ... destinés à être ouverts en service doivent être imperdables.

12. PROTECTION ELECTRIQUE :

Les engins électriques doivent être protégés par un disjoncteur (contacteur - disjoncteur) équipés de trois relais thermiques. Ces relais fonctionnent avec un retard qui dépend de la surintensité.

Les disjoncteurs des moteurs seront en outre avantageusement équipés de relais à tension nulle, ce qui empêche la remise en marche imprévue d'un moteur après une disparition intempestive momentanée de la tension du réseau.

==================================

CHAPITRE VI

LA TRACTION ELECTRIQUE

§ 1 . GENERALITES SUR LA TRACTION ELECTRIQUE

Certains pays ont complètement électrifié leur réseau de chemins de fer, d'autres ont procédé à l'électrification de leurs grandes lignes, d'autres enfin ne semblent pas s'engager dans cette voie et envisagent de n'utiliser que la traction diésel. Les défenseurs de ces trois politiques avancent des arguments dont la partialité est loin d'être exclue. Il est nécessaire de poser exactement le problème et d'énoncer des principes certains.

1) Il va de soi que l'électrification n'est pas rentable si un trafic minimum n'est pas assuré. L'amortissement des installations coûteuses est si élevé que le prix de revient du train-kilomètre est prohibitif si la ligne n'est pas parcourue par un certain nombre de trains par jour, que nous appellerons nombre critique. La Deutsche Bundesbahn considère que l'électrification se justifie dès que le trafic atteint 40 trains par jour. Cette opinion ne vaut que pour l'Allemagne Occidentale où le prix de revient élevé du combustible pour moteur diésel est provoqué par des taxes fiscales qui le frappent et où le prix du kWh est réduit grâce aux installations hydro-électriques et aux centrales qui utilisent le lignite comme combustible de base.

2) Un pays dépourvu de gisements de pétrole ne peut admettre que le pétrole et ses dérivés soit l'unique source d'énergie pour l'ensemble de ses moyens de transport (route, eau, air, fer). Une perturbation grave dans les pays où les gisements de pétrole sont exploités aboutirait à paralyser complètement toute vie économique.

3) Un pays qui possède des mines de charbon doit envisager la valorisation des schlamms et des produits de faible valeur dont la seule utilisation possible consiste en l'alimentation de chaudières de centrales électriques.

L'accroissement de consommation électrique qui résulte de la traction électrique et le fait que le maximum de puissance consommée par la traction électrique a lieu à un moment où les

réseaux électriques ne débitent pas la puissance maximum a pour conséquence une réduction du prix de revient du kWh, ce qui devrait profiter à l'ensemble de l'économie du pays.

L'état profite en outre de certaines taxes supplémentaires d'ordre fiscal sur les combustibles vendus, l'énergie facturée. L'utilisation de déchets sans valeur commerciale est un bénéfice net pour le pays, bien qu'il n'apparaisse évidemment dans aucun document comptable.

4) La traction électrique permet des performances qu'aucun autre mode de traction ne peut égaler.

On construit des locomotives électriques de 6000 chevaux (x) alors que la plus puissante locomotive diésel atteint à peine 2000 chevaux. Il en résulte immédiatement que la locomotive électrique peut remorquer des trains lourds rapides sur une ligne accidentée tandis qu'il faut deux ou trois locomotives diésel pour accomplir les mêmes performances.

Avant l'électrification de la ligne Bruxelles-Luxembourg il fallait deux locomotives à vapeur ou locomotive diésel pour remorquer un express lourd, une seule locomotive électrique peut accomplir aisément la même performance dans le même horaire. La traction électrique exige un nombre réduit d'engins à égalité de trafic.

Les dépenses d'entretien d'une locomotive électrique sont trois fois plus faibles que celles d'une locomotive diésel.

5) La traction électrique est frappée d'un handicap grave lorsque le réseau est partiellement électrifié : lors d'une interruption de trafic (déraillement), le service doit souvent être détourné sur des lignes qui ne sont pas électrifiées, ce qui entraîne des complications d'exploitation.

6) Les conséquences d'un déraillement sur une ligne électrifiée sont souvent plus graves que dans le cas d'une ligne ordinaire. Les poteaux de la caténaire peuvent être endommagés, voire renversés, les équipes de relevage ne jouissent plus d'une aussi grande liberté de manoeuvre.

(x) La puissance d'une locomotive diésel est souvent définie par la puissance du moteur diésel, ce qui est fondamentalement inexact car il faut tenir compte du rendement de la transmission, de la consommation des compresseurs, ventilateurs, etc ... Il faudrait que la puissance des locomotives diésel soit définie comme en traction électrique par la puissance aux jantes des roues.

Toutefois ces inconvénients réels peuvent être réduits grâce à des mesures appropriées : équipes de relevage bien entraînées, bien outillées, constitution d'éléments standards de secours pour support provisoire de la caténaire, etc ...

7) Le prix d'une locomotive diésel dépasse assez bien celui d'une locomotive électrique qui est cependant plus puissante. En outre, il faudra pour assurer le même service un nombre supérieur de locomotives diésel. Par contre, le coût des installations fixes (caténaires et sous-stations) est plus élevé que celui des installations fixes nécessaires pour les engins diésel (réservoirs à mazout, installation de distribution, machines pour la révision des moteurs, etc...).

Il faudra un trafic très intense pour que le coût de la tonne transportée ou du voyageur transporté soit moindre en traction électrique.

8) Du fait de ses performances élevées, la traction électrique se prête à une très grande souplesse d'exploitation (accroissement de la vitesse pour réduire un retard, augmentation de la charge).

9) L'électrification d'une seule ligne d'un réseau implique la conservation en bon état de marche des engins susceptibles de pallier une perturbation grave sur cette ligne importante. On perd de ce fait une partie importante des économies réalisées par la traction électrique, car les engins propres à la traction diésel ou vapeur doivent être maintenus et entretenus pour une faible utilisation éventuelle.

CONCLUSION : L'électrification d'une seule ligne d'un réseau est généralement peu justifiée; s'il faut électrifier, il faut le faire sur une bonne partie du réseau. La décision d'électrifier ou de diéseliser dépendra des circonstances locales : importance du trafic, profil des lignes, prix du combustible, intérêt général, etc ...

x

x x

1. LES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRACTION ELECTRIQUE :

La traction électrique s'est développée dans une série de pays qui ont appliqué différentes méthodes.

On peut, en effet, envisager le problème de l'électrification sous deux angles différents :

1) le problème du transport du courant

2) le problème de la construction du meilleur moteur

L'énergie électrique est très aisément transportée en courant alternatif à haute tension, elle peut être transformée en courant à basse tension à bord des engins.

Histoire de l'électrification des chemins de fer

Dès 1902, les chemins de fer de l'état prussien ont effectué des essais sensationnels pour l'époque sur la ligne Zossen-Marienfelde en réalisant une vitesse de 202 km par heure. Les engins étaient alimentés en courants triphasés à la tension de 10000 volts au moyen de trois perches de prise de courant superposées. L'utilisation de courants triphasés pose une série de problèmes de montage des lignes au voisinage des aiguillages, traversées de voies, etc ...

Cette solution n'est plus appliquée dans les récentes électrifications; autrefois, les chemins de fer italiens ont équipé quelques lignes en utilisant la tension triphasée de 3600 volts.

Les premières tentatives d'électrification en courant monophasé 50 Hz n'ont pas réussi car les moteurs monophasés construits à cette époque fonctionnaient mal pour cette fréquence. La difficulté réside au démarrage : les spires en commutation sous les balais du moteur série monophasé sont évidemment court-circuitées par ces derniers, le courant y est intense, car la variation de flux est importante et rapide.

Pour réduire l'importance de ces courants de court-circuit, l'on a réduit la fréquence. Les réseaux suisse et suédois sont quasi complètement électrifiés à la tension monophasée de 15000 volts 16 2/3 Hz. Les réseaux allemand, autrichien et norvégien poursuivent l'électrification de leurs lignes principales en utilisant le même principe. En 1958, le système monophasé 16 2/3Hz est utilisé sur plus de la moitié des lignes européennes électrifiées.

La difficulté de réaliser un moteur à collecteur monophasé et les sujétions qui sont inhérentes à l'adoption d'une fréquence spéciale ont fait envisager vers 1920 en France et en Italie

un système à courant continu : l'énergie est fournie aux engins sous forme d'une tension continue d'assez faible valeur puisqu'il est pratiquement impossible de réaliser des moteurs à courant continu à haute tension. La tension de 1500 volts a été utilisée en France, puis en Hollande, tandis que le réseau italien utilisait une tension de 3000 volts; il fut suivi par les réseaux espagnol, polonais, russe, belge et tout récemment par le réseau tchèque. Outre-mer le système à 3000 volts est utilisé au Maroc, au Chili et sur une partie du réseau électrifié des Indes.

Cette vogue du courant continu est due à l'excellence du moteur série et à sa grande aptitude aux démarrages énergiques.

Au début de l'électrification, les réseaux de distribution étaient faibles et incapables de fournir l'énergie demandée par la traction; les chemins de fer durent établir leurs propres centrales. C'est ainsi que les chemins de fer allemand et suisse construisirent des centrales et un réseau de distribution à la fréquence de 16 2/3 Hz. Cette fréquence ne posait à l'époque aucun problème spécial. Mais actuellement, il parait évidemment anti-économique que les chemins de fer construisent des centrales électriques et des réseaux qui dédoubleraient bien inutilement les installations ordinaires de distribution.

Cette considération a été à l'origine de nouvelles recherches pour l'utilisation de la fréquence de 50 Hz. Les chemins de fer allemands sous l'impulsion du docteur-ingénieur Schön de la maison Krupp avaient réalisé vers 1936 l'électrification d'une ligne très accidentée dans la Forêt Noire; les essais donnèrent satisfaction et d'autres firmes allemandes dont l'A.E.G. et Siemens mirent au point des locomotives à 50 Hz. Le réseau allemand estima que le système était viable mais que l'électrification à la fréquence 16 2/3 Hz était déjà trop répandue, que les troubles d'exploitation allaient être excessifs et qu'il était impossible de revenir en arrière. Toutefois, la ligne fut maintenue en service sous la tension alternative de 50 Hz.

Au cours de l'occupation de cette région en 1945, les chemins de fer français continuèrent les essais et il en résulta une remise en vogue du système dont la tension fut portée à 25000 volts 50 Hz. Pour un même écartement des sous-stations et un même trafic les chutes de tension inductives sont plus élevées que dans le cas d'utilisation d'une fréquence réduite.

L'électrification à la fréquence industrielle a pu bénéficier des progrès les plus récents, tels que l'apparition des ignitrons et des redresseurs au germanium et au silicium. Ce système permet de combiner les avantages de la traction en courant continu et de bénéficier de la souplesse de distribution propre au courant alternatif.

Pour le cas particulier de la Belgique, il est également trop tard pour admettre un autre système que le système à 3000 volts car le réseau est bien trop petit pour permettre l'exploitation de deux systèmes différents. L'exploitation des gares de Bruxelles où convergent presque toutes les lignes serait impossible car ces gares devraient en fait être composées de deux demi-gares complètement indépendantes : l'une pour le réseau alternatif, l'autre pour le réseau continu ; le matériel roulant actuel ne pouvant évidemment être capable d'aller d'un réseau à l'autre. Le coût du remplacement des installations actuelles à 3000 volts et du matériel roulant de ce type par des installations à 50 Hz est tellement prohibitif qu'il faut y renoncer. Faute de place, il serait d'autre part impossible d'installer dans le matériel actuellement en service un transformateur et des redresseurs pour permettre la circulation sur un réseau alimenté par une tension alternative.

2. ELEMENTS FONDAMENTAUX COMMUNS AUX DIVERS SYSTEMES :

Avant de comparer en détail les divers systèmes, il convient d'examiner leurs éléments communs.

Considérant un train pesant Q tonnes à remorquer à une vitess v (en km/h) par une locomotive pesant L tonnes sur une ligne en palier et alignement droit, l'effort moteur F équilibre l'ensemble des résistances à l'avancement et assure éventuellement l'accélération résiduelle.

Supposons celle-ci nulle et appelons :

R la résistance en kg par tonne de train remorqué

r la résistance en kg par tonne de locomotive

L'équation de définition de F est donnée par la relation :

$$F = L \times r + Q \times R$$

La puissance développée par la locomotive vaut :

$$\frac{F \times v \times 1000}{3600 \times 75} = \frac{F \times v}{270} \quad \text{en chevaux}$$

et la puissance absorbée par la locomotive vaut :

$$\frac{F \times v}{270 \times k}$$

où k représente le rendement de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Si le train doit gravir une rampe, dont l'inclinaison est exprimée par p mm par m de longueur, l'effort F devient :

$$F = L \times r + Q \times R + (L + Q)\ p$$

Si le train doit aborder une courbe, la résistance r' supplémentaire provoquée par cette courbe peut être assimilée à celle que donnerait une rampe d'inclinaison d'autant plus importante que le rayon de la courbe est plus petit :

$$r' = \frac{800}{R}$$ où R représente le rayon de la courbe

Si l'on désire qu'une accélération résiduelle de a cm/sec^2 soit encore fournie au train lorsqu'il atteint la vitesse v, l'effort supplémentaire est exprimé par :

$$\frac{(L + Q) \times 1000}{981} \times a$$

a = cm/sec²

En première approximation, on peut donc dire qu'une accélération de a cm/sec^2 correspond à un effort identique à celui demandé pour gravir une rampe dont le supplément d'inclinaison est mesuré en mm par m par la valeur de a.

Ces rappels de mécanique élémentaire permettent de calculer la puissance motrice à prévoir pour accomplir une performance déterminée ; par exemple : remorquer en palier une charge de 2000 T à la vitesse v, une charge de 800 T à la vitesse v sur une rampe donnée. On peut utiliser un raisonnement analogue pour calculer la puissance à prévoir pour les moteurs d'une automotrice destinée à accomplir un trajet déterminé en un temps donné.

Si le parcours comporte de nombreux arrêts, l'accélération initiale jouera un grand rôle dans la détermination des caractéristiques des moteurs comme il ressort des considérations à déduire du calcul d'un horaire (voir plus loin).

La puissance motrice est transmise aux roues par l'intermédiaire d'un pignon attaquant une couronne dentée calée sur l'essieu. Le constructeur dispose toutefois d'un élément d'ordre mécanique qui lui permet de jouir d'une plus grande liberté pour la détermination des caractéristiques du moteur. Le diamètre des roues motrices et le rapport d'engrenages entre le pignon attaqué par l'arbre moteur et la couronne dentée calée sur l'essieu moteur peuvent varier dans des limites assez larges.

L'on sait d'autre part que toutes autres choses étant égales, le moteur électrique sera d'autant plus léger et plus petit qu'il tourne plus rapidement.

3. CHOIX DU RAPPORT D'ENGRENAGES :

Le choix du rapport d'engrenages pour un diamètre de roues déterminé peut faire l'objet d'une recherche approfondie pour que l'ensemble de l'équipement soit utilisé au rendement optimum.

Le raisonnement suivant est valable pour un train alimenté en courant continu effectuant un service avec arrêts fréquents. L'on verra ultérieurement que pour démarrer un engin de traction alimenté en courant continu, il faut intercaler en série avec les moteurs de traction des résistances de démarrage de valeur progressivement décroissante pour maintenir à peu près constant le courant absorbé. L'énergie perdue dans les résistances de démarrage vaut :

$$\int r\, i^2\, dt$$

intégrale étendue à tout le temps du démarrage sur résistance. Les résistances de démarrage sont éliminées quand la force contre-électromotrice développée dans les moteurs est suffisante pour réduire le courant à une valeur acceptable.

Le couple appliqué aux roues motrices sera (toutes choses égales d'ailleurs pour le moteur) d'autant plus énergique que le rapport d'engrenages est plus élevé c'est-à-dire que l'accélération est plus importante.

Le temps d'élimination des résistances de démarrage sera donc d'autant plus bref et l'énergie perdue dans ces résistances sera d'autant plus faible que le rapport d'engrenages est plus élevé. Comme les moteurs ne peuvent tourner au-delà d'une vitesse limite, les engins rapides doivent être équipés d'un rapport d'engrenages faible.

Ceci démontre qu'une automotrice (x) construite pour rouler à très grande vitesse, supérieure à 160 km/h par exemple, ne convient pas pour un service omnibus, surtout en ligne accidentée. Le démarrage dans les rampes serait trop pénible et les résistances de démarrage s'échaufferaient dangereusement.

(x) On appelle automotrice, par opposition à locomotive, un engin accessible aux voyageurs, doté de tout l'appareillage électrique de traction pour être autonome. Les automotrices sont souvent composées de deux voitures, elles peuvent être réunies ensemble pour former un train composé de 4, 6 ou 8 voitures.

Il va de soi que le choix d'un rapport d'engrenages élevé limite la vitesse maximum de l'automotrice affectée aux services omnibus.

Le rapport d'engrenages ne doit pas être démesurément excessif. Indépendamment des questions constructives qui interdisent un rapport d'engrenages trop élevé sans complication interdite par le manque de place, il faut noter l'entrée en jeu du coefficient d'adhérence.

Pour un courant déterminé, l'effort moteur appliqué à l'essieu est proportionnel au rapport d'engrenages. Toutefois, en pratique, l'effort moteur est limité par le coefficient d'adhérence limite. Tout effort dépassant la limite d'adhérence provoque l'emballement de l'essieu et la suppression de tout effort moteur efficace. Il en résulte que l'accroissement indéfini du du rapport d'engrenages entraînerait à partir d'une certaine valeur une réduction du courant par l'insertion de résistance complémentaire, ce qui réduirait le rendement énergétique par l'accroissement du terme :

$$\int r\, i^2\, dt$$

Pour les automotrices construites en 1950, avec un rapport d'engrenages de 3,65, la consommation d'énergie en service omnibus est réduite d'environ 5% par rapport à une automotrice similaire dont le rapport d'engrenages serait de 2,87. Cette différence de 5% a cependant une signification réelle car une réduction des dépenses de 5% constitue en fait, un bénéfice pur. Il faut noter que pour un même rapport d'engrenages, une augmentation du diamètre des roues joue le même rôle qu'une réduction fictive du rapport d'engrenages.

Remarque : La S.N.C.F. construit des locomotives électriques qui sont pourvues de deux rapports d'engrenages. Le rapport élevé est utilisé par les trains de marchandises, le rapport faible par les trains de voyageurs rapides.

4. COEFFICIENT D'ADHERENCE :

Le coefficient d'adhérence varie avec la vitesse. On peut le définir par le rapport entre l'effort de traction appliqué à une roue parallèlement au rail et le poids supporté par cette roue. Le coefficient d'adhérence limite est fonction de nombreuses variables : humidité, état de surface de roulement, du bandage, etc ...

A titre d'exemple, une pluie fine abaisse le coefficient d'adhérence plus qu'une averse. On peut admettre un coefficient d'adhérence moyen compris entre 0,15 et 0,2. Ce coefficient peut s'élever à 0,3 si l'on fait usage de sable sec. Le patinage d'un essieu qui résulte d'un effort tangentiel supérieur à celui donné par le coefficient d'adhérence peut entraîner des conséquences désastreuses allant jusqu'à l'emballement du moteur et sa destruction par la dislocation du sertissage et des enroulements.

Nous verrons que ce danger est plus grave à la tension de 3000 Volts et que de ce fait les performances au démarrage d'un engin alimenté en courant continu 3000 V sont moindres que celles d'un engin alimenté par une autre source d'énergie.

5. RESISTANCE AU ROULEMENT EN PALIER ET ALIGNEMENT DROIT :

La résistance au roulement d'un véhicule est fonction de la section droite du véhicule, du carénage de la caisse, de la nature des paliers, du graissage des coussinets et du poids du véhicule.

Ces éléments ne sont pas tous indépendants, par exemple, la qualité du graissage est fonction du poids par essieu. De nombreuses formules empiriques ont été établies, les meilleures d'entre elles sont reprises ci-dessous.

La résistance est définie par l'effort nécessaire pour déplacer une tonne de l'engin, on l'appellera résistance spécifique. Pour une locomotive électrique, elle vaut :

$$r = 3 + \frac{1}{16} \left(\frac{v}{10}\right)^2 \quad \text{où } v \text{ est exprimé en km/h}$$

Pour les voitures remorquées, elle vaut :

$$r' = 2 + \frac{1}{40} \left(\frac{v}{10}\right)^2$$

La différence entre ces deux formules peut être interprétée comme suit : A vitesse nulle, la locomotive doit par tonne d'engin présenter une résistance plus élevée en raison de la masse des moteurs et de la présence des pignons et couronnes dentées.

La résistance présentée par l'air, qui est une fonction quadratique de la vitesse est évidemment plus faible pour une voiture que pour le véhicule de tête.

Si le train était remorqué par deux locomotives, la formule donnant la résistance spécifique de roulement de la deuxième locomotive serait :

$$r = 3 + \frac{1}{40} \left(\frac{v}{10}\right)^2$$

Si le train est composé de wagons de marchandises, il faut appliquer des tableaux propres à chaque réseau qui expriment la résistance spécifique par tonne de wagon en fonction du poids des wagons et de leur charge (wagons vides, wagons chargés). Pour les voitures à voyageurs, la différence entre voitures vides et voitures pleinement occupées joue mais comme en principe les voitures doivent être occupées, les calculs doivent être établis sur cette base.

Pour le calcul de la résistance spécifique d'une automotrice, il faut distinguer également entre la voiture de tête et les autres véhicules.

Résistance spécifique de la voiture de tête :

$$R = 0{,}65 + \frac{13{,}15}{Q} + 0{,}014\ v + 0{,}004512\ \frac{Sv^2}{P}$$

Résistance spécifique des autres voitures :

$$R' = 0{,}65 + \frac{13{,}15}{Q} + 0{,}014\ v + 0{,}000639\ \frac{Sv^2}{P}$$

Q représente la charge en tonnes par essieu

P représente le poids de la voiture en tonnes

v représente la vitesse en km/h

S représente la section droite faite à travers le véhicule perpendiculairement à son axe longitudinal ; en pratique $S = 10\ m^2$.

6. REGULATION DE LA VITESSE :

Alimenté à une tension déterminée un moteur développe un couple qui dépend de la vitesse. Le moteur se mettra en régime à une vitesse telle que l'égalité entre le couple moteur et le couple résistant soit réalisé.

Dans le cas d'un moteur à courant continu, la tension du réseau est supposée constante, l'engin prendra automatiquement une vitesse déterminée, il serait impossible sans artifice de rouler à une vitesse plus faible avec une accélération nulle.

L'artifice consiste dans le groupement des moteurs en série et en parallèle, ce qui procure un certain nombre de vitesses d'équilibre correspondant au nombre de groupements. Les vitesses d'équilibre sont fonction de la charge remorquée et du profil de la ligne. Une nouvelle série de vitesses d'équilibre plus élevées peut en outre être réalisée par le shuntage partiel des pôles inducteurs. L'insertion de résistances de démarrage n'est admissible que durant le démarrage. Rouler en permanence avec des résistances insérées dans l'induit serait prohibitif pour deux raisons : énergie électrique dépensée en effet Joule et dimensionnement des résistances. Les vitesses d'équilibre en courant continu sont donc en nombre réduit.

Si l'alimentation est réalisée en courant alternatif : le primaire du transformateur est alimenté par la ligne de contact. Les enroulements peuvent être bobinés de telle sorte qu'on puisse avoir 20 à 30 prises différentes dont chacune correspond à une autre tension appliquée aux moteurs. On a donc en courant alternatif une famille de courbes de couple en fonction de la vitesse, ce qui donne aux engins une grande souplesse d'exploitation. En outre, le démarrage peut se faire sans insertion de résistances. Il en résultera un certain gain d'énergie.

Le système mixte consistant à transformer le courant alternatif en courant continu par l'intermédiaire de redresseurs permet de réaliser la combinaison des avantages des deux modes de traction.

Les considérations émises au sujet de la valeur optimum du rapport d'engrenages d'un engin alimenté en courant continu ne s'appliquent pas aux engins alimentés sous une tension alternative car il n'y a pas de pertes dans les résistances de démarrage. Le rendement de ces engins est meilleur, toutes autres choses égales. Le choix du rapport d'engrenages est basé uniquement sur les performances mécaniques de l'engin et des moteurs de traction et notamment de leur vitesse maximum de rotation.

7. PUISSANCE DES MOTEURS - DEFINITIONS :

La puissance que peut développer un moteur électrique dépend de la tension appliquée et du courant absorbé. La tension imposée au moteur est par définition la tension nominale du réseau (au rapport de transformation et au couplage près).

La puissance fournie par le moteur n'est limitée, du moins de façon approchée, que par l'échauffement qu'il peut supporter ou plus exactement que les isolants peuvent supporter.

On conçoit donc qu'un moteur, supposé froid au démarrage, puisse fournir une performance élevée durant une heure et que par contre la puissance qu'il peut débiter indéfiniment est moindre.

On définit donc deux puissances :

1) la puissance unihoraire qui est celle que le moteur peut développer durant une heure

2) la puissance continue est celle que le moteur peut fournir indéfiniment

On verra plus loin qu'il existe une relation entre le courant absorbé par un moteur et sa vitesse de rotation.

La puissance continue est liée à la vitesse continue et la puissance unihoraire est liée à la vitesse unihoraire.

Toutes autres choses égales, un moteur de traction absorbe un courant d'autant plus faible qu'il tourne plus vite. La puissance continue, moins élevée que la puissance unihoraire, correspond à une vitesse continue plus élevée que la vitesse unihoraire, ce qui parait paradoxal, mais est parfaitement logique.

---

§ 2 . LA TRACTION ELECTRIQUE EN COURANT CONTINU

Le seul moteur utilisable en courant continu est le moteur série. Le moteur shunt ne pourrait convenir pour deux raisons :

1) fragilité d'un enroulement shunt à fil fin

2) difficulté de la commutation lors d'un brusque changement de tension

Le flux inducteur varierait lentement dans un moteur shunt, le courant absorbé varierait brutalement dans des proportions dangereuses lors d'un rapide changement de tension.

Ces deux difficultés réduisent également la possibilité d'utiliser un moteur à excitation indépendante, qui présenterait d'autre part des avantages séduisants grâce à la possibilité de régler l'effort en faisant varier l'excitation. Le moteur compound est éliminé également pour les mêmes raisons que le moteur shunt.

Les courbes"courant-vitesse", "effort-vitesse" du moteur série jouent un rôle extrêmement important. De ces deux courbes il sera possible de déduire :

a) le temps nécessaire pour effectuer un trajet déterminé

b) la consommation d'énergie pendant ce trajet

c) la puissance instantanée consommée par une ligne

d) la puissance des sous-stations qui alimentent une ligne.

e) la section des caténaires et la distance entre sous-staions.

Accessoirement, l'étude peut montrer l'économie importante réalisée par un allongement des horaires surtout en service à arrêts rapprochés.

On peut également calculer l'horaire le plus économique pour un temps de parcours déterminé c'est-à-dire imposer au conducteur du train un planning de conduite de façon que l'énergie consommée soit minimum. Ceci suppose évidemment que le train ne roule pas à une vitesse constante sur tout son parcours.

x

x x

1. CARACTERISTIQUES DU MOTEUR SERIE :

a) Caractéristique magnétique du moteur (figure 1)

La caractéristique magnétique est relevée de la façon suivante : la machine est excitée par une source indépendante et tourne à une vitesse constante. On mesure la tension aux bornes de la dynamo en fonction du courant d'excitation. Cette courbe donne une image complète du circuit magnétique dont la saturation joue un grand rôle. La tension est évidemment proportionnelle à la vitesse de rotation pour un même courant d'excitation.

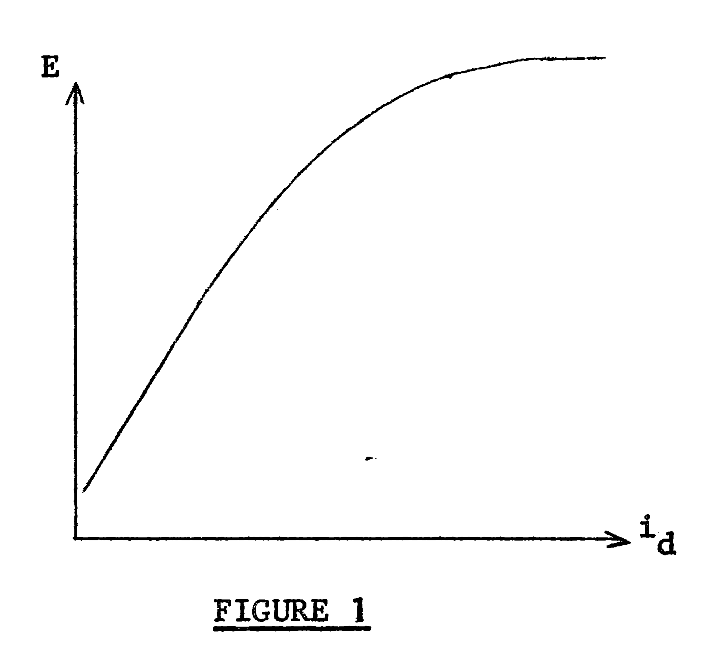


FIGURE 1

b) Caractéristique Vitesse de rotation-courant

La caractéristique Vitesse de rotation-Courant est déduite de la caractéristique magnétique.

En effet, appelons :

U la tension aux bornes du moteur

E la force contre électromotrice

I le courant absorbé

R la résistance totale de l'induit et de l'inducteur

N la vitesse de rotation

Φ le flux inducteur

K une constante

l'équation fondamentale d'un moteur à courant continu est :

$$U = E + R\,I \quad \text{où} \quad E = K\,N\,\Phi$$

Traçons une droite de coefficient angulaire R passant par l'origine et ayant pour équation :

$$y = R\,I$$

Cette droite représente la chute de tension interne de la machine. Portons à partir de cette droite pour les différentes valeurs de I, les diverses valeurs de la tension à vide de la caractéristique magnétique; pour différentes vitesses de rotation nous obtenons une famille de courbes (figure 2) représentant la relation :

$$U = E + R\,I$$

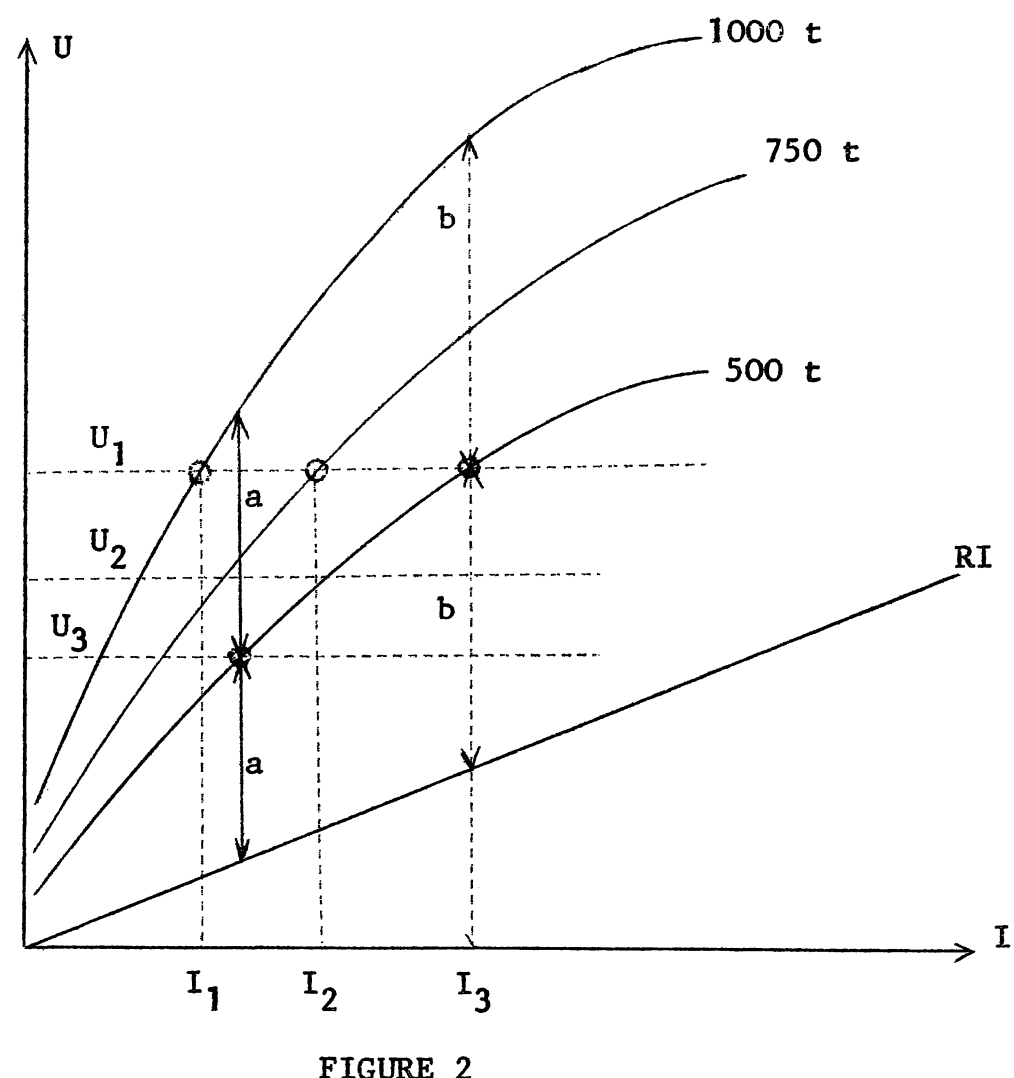


FIGURE 2

Traçons une série de droite parallèles à l'axe des x qui correspondent à des valeurs différentes de la tension U. Pour une valeur déterminée de U, il y a par courbe un point auquel correspondent une vitesse de rotation et un courant.

Nous pouvons donc obtenir une série de couples de valeurs correspondantes de vitesse et de courant qui permettent de tracer la seconde caractéristique fondamentale: "Vitesse-Courant" (figure 3) à tension constante. Il sera exposé ultérieurement les différentes déformations de cette courbe caractéristique en fonction de la tension U appliquée.

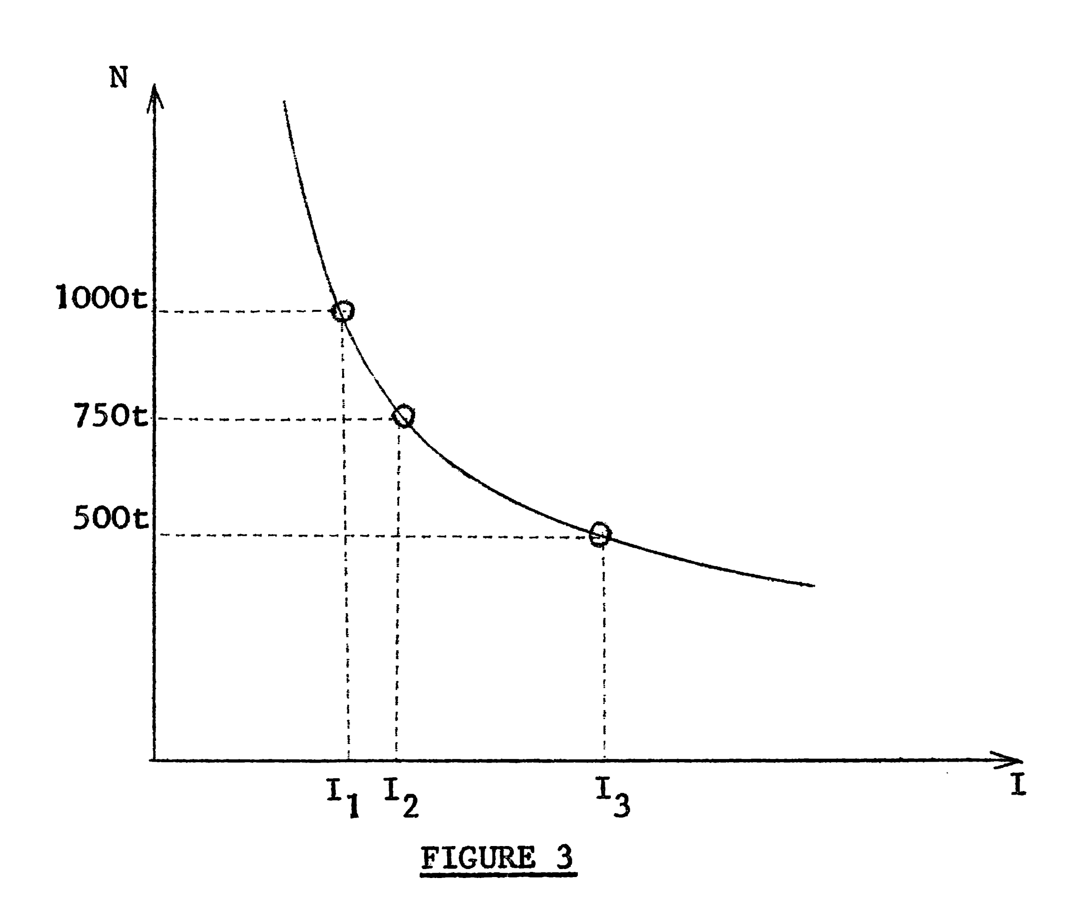


FIGURE 3

c) Caractéristique "Couple-Courant"

En raison de la saturation cette courbe a à peu près l'apparence d'une droite coupant l'axe des courants en un point situé à droite du point de rencontre des axes (figure 4).

N.B. Dans la pratique des calculs, on transforme l'échelle de l'axe des vitesses en la graduant en km/h ce qui est aisé en tenant compte du rapport d'engrenages et du diamètre des roues. De même l'échelle des couples est transformée en une échelle des efforts tangentiels aux roues.

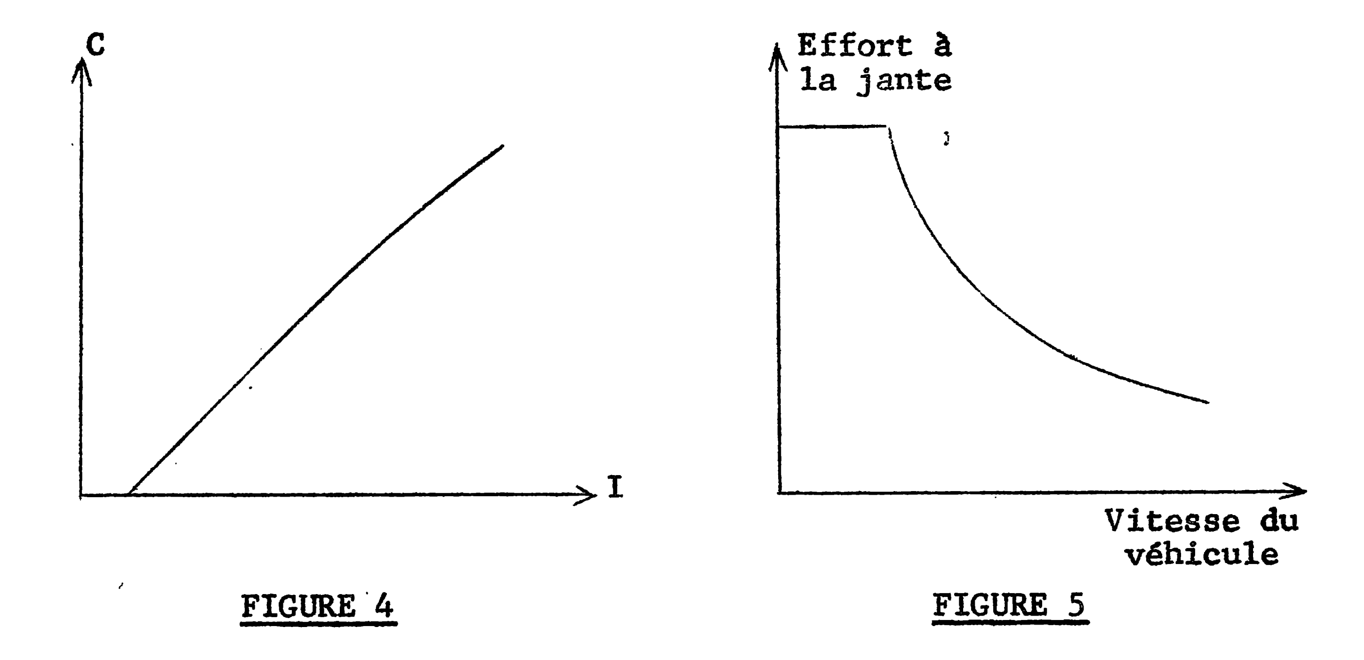


FIGURE 4 FIGURE 5

d) Caractéristique "Effort-Vitesse"

Les deux caractéristiques précédentes peuvent être fusionnées dans une courbe unique "effort-vitesse" valable pour une tension U, un rapport d'engrenages et un diamètre des roues déterminés.

Cette courbe donne pour le véhicule équipé d'un moteur dont les caractéristiques mécaniques sont fixées, l'effort à la jante en fonction de la vitesse. Si le véhicule est équipé de n moteurs, il suffit de multiplier l'effort correspondant à un moteur par le nombre de moteurs.

Pour obtenir cette courbe, l'on relève, pour une même valeur du courant, un point sur la courbe des vitesses et un autre point sur la courbe des efforts. L'on obtient deux valeurs associées qui peuvent faire l'objet d'une représentation graphique (figure 5).

En fait, en raison de l'adhérence, la courbe des efforts débutera par un tronçon horizontal qui correspond à la marche sur résistance de démarrage. Pour ce tronçon, le moteur n'est évidemment pas alimenté à tension constante.

2. MODIFICATION DES COURBES CARACTERISTIQUES :

Les courbes caractéristiques : Vitesse-Courant, Effort-Courant et Effort-vitesse sont établies pour une tension déterminée, il convient de voir comment ces courbes se modifient lors d'une variation de la tension.

a) Courbe Vitesse-Courant

Remplaçons la tension U par une tension U' et écrivons deux fois les équations fondamentales pour une même valeur de I :

$$U = R\,I + K\,N\,\Phi \quad \text{et} \quad U' = R\,I + K\,N'\,\Phi$$

d'où :

$$\frac{U - RI}{U' - RI} = \frac{N}{N'}$$

Cette division permet d'éliminer K Φ, ce qui est possible puisque I est identique de part et d'autre.

L'on voit que :

$$N' = \frac{U' - RI}{U - RI} \times N$$

L'on peut donc tracer point par point la nouvelle courbe en calculant pour chaque valeur du courant la vitesse d'après la formule énoncée ci-dessus.

b) Courbe Effort-Courant

La courbe effort-courant n'est pas modifiée car le couple ne dépend que du courant :

$$C = k\,\Phi\,I$$

Il n'y a pas de contradiction avec ce qui précède car si pour un courant donné, le couple est constant, la vitesse est évidemment fonction de la tension appliquée.

c) Courbe Effort-Vitesse

Du fait de la modification de la courbe Vitesse-Courant, cette courbe se modifie et son tracé peut être aisément exécuté par le lecteur.

3. CAS PARTICULIERS IMPORTANTS :

a) Résistance insérée dans le circuit

Appelons U la tension constante d'alimentation et r la résistance insérée devant le moteur. Les équations deviennent :

$$U = R\,I + K\,N\,\Phi \qquad U = (R+r)\,I + K\,N'\Phi \quad \text{et} \quad C = k\,\Phi\,I$$

La courbe de l'effort en fonction du courant est inchangée. L'équation de définition de la vitesse N' en supposant l'intensité constante est :

$$N' = \frac{U - (R+r)\,I}{U - R\,I} \times N$$

La courbe peut être trouvée point par point à partir de la courbe caractéristique.

La courbe Effort-Courant reste inchangée et la courbe Effort-Vitesse peut aisément être déduite.

b) Groupement en série des moteurs

Considérons deux moteurs identiques connectés en série. La tension U est appliquée à l'ensemble du circuit. Pour obtenir les courbes caractéristiques, nous écrirons les équations fondamentales valables pour un même courant :

$$U = R\,I + K\,N\,\Phi \qquad \text{1 seul moteur}$$

$$0{,}5U = R\,I + K\,N'\Phi \qquad \text{2 moteurs}$$

Il vient :

$$N' = \frac{0{,}5\,U - R\,I}{U - R\,I} \times N$$

La courbe Vitesse-Courant peut être tracée point par point. La courbe Effort-Courant reste inchangée et la courbe Effort-Vitesse peut être déduite facilement.

4. DEMARRAGE DU MOTEUR SERIE :

De l'équation fondamentale $U = RI + KN\Phi$ l'on déduit que pour limiter le courant de démarrage, il faut intercaler une résistance r telle que :

$$I = \frac{U}{R + r}$$

Du fait de l'application du couple moteur, il nait une force contre électromotrice qui réduit l'intensité à :

$$I' = \frac{U - K\,N\,\Phi}{R + r}$$

Le courant absorbé diminuera rapidement et il faut prévoir une élimination d'une fraction de la résistance pour permettre au courant de croître à nouveau. La force contre-électromotrice va continuer à croître, il faudra donc éliminer une nouvelle fraction de résistance pour permettre au moteur d'absorber le même courant.

On peut évidemment laisser au conducteur d'un tramway le soin d'éliminer les résistances au jugé. La conduite de ce véhicule serait d'ailleurs inconcevable si cette liberté n'était pas laissée au conducteur ; mais en traction électrique, il serait inadmissible de laisser au conducteur la responsabilité d'éliminer les résistances. Celles-ci devraient être dimensionnées pour dissiper une énergie importante durant un temps quelconque, ce qui serait pratiquement insoluble. Du point de vue économique, il y aurait gaspillage d'énergie inadmissible. On doit donc éliminer la résistance de démarrage de façon progressive et systématique.

La résistance doit être fractionnée en éléments suffisamment petits pour que le courant durant le démarrage oscille entre deux valeurs extrêmes I_{Max} et I_{min}

5. CALCUL GRAPHIQUE DU FRACTIONNEMENT DE LA RESISTANCE :

La résistance totale est donnée par la formule :

$$R + r = \frac{U}{I_{Max}}$$

où R représente la résistance totale du moteur (inducteur + induit)

L'équation fondamentale du moteur permet de trouver un procédé graphique de calcul du fractionnement de la résistance:

$$U = (R + r)\,I + K\,N\,\Phi$$

Déduisons la valeur de r en fonction de N quand U, R et I sont constants :

$$r = \frac{U - KN\Phi}{I} - R$$

La relation entre r et N est une droite dont il suffit de connaître deux points pour la tracer.

La résistance au premier moment du démarrage r vaut :

$$\frac{U}{I_{Max}} - R \quad \text{car la vitesse est nulle } (N = 0)$$

La résistance à la fin du démarrage est nulle mais la vitesse peut être trouvée sur la courbe vitesse-courant.

La droite tracée représente les valeurs successives qu'il faudrait donner à la résistance de démarrage pendant le démarrage pour que le courant conserve constamment la valeur I_{Max}. Ceci impliquerait une série théoriquement infinie de manoeuvres. En pratique, l'on peut admettre que le courant varie entre deux limites : I_{Max} et I_{min}

La droite qui donne la relation f(r,N) à courant constant est représentée à la figure 6.

Comme l'on s'est fixé deux limites I_{Max} et I_{min} entre lesquelles le courant variera durant le démarrage, il faut tracer les deux droites correspondant à ces deux valeurs. La droite a correspond à la valeur I_{Max}, la droite b à la valeur I_{min}.

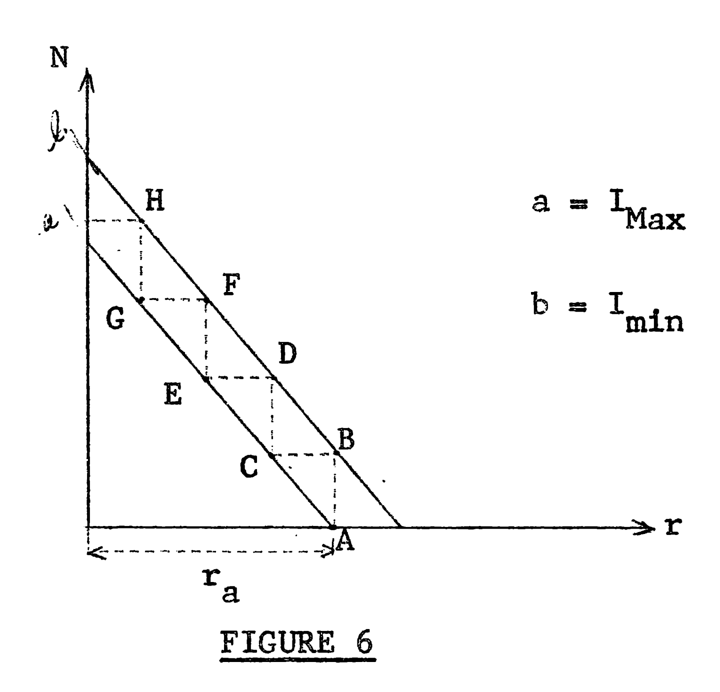


FIGURE 6

Lorsque l'engin démarra sous I_{Max}, la résistance insérée vaut r_a. Du fait de la rotation du moteur le courant diminue, à un moment donné le courant atteint la valeur I_{min}, la résistance insérée étant toujours r_a, le point du graphique correspondant est B. Si l'on veut que le courant reprenne pour la

vitesse N_B la valeur I_{Max}, il faut que la résistance soit réduite à l'abscisse correspondant au point C. La vitesse va de nouveau croître et le courant diminuera jusqu'à la valeur I_{min} ce qui permet d'obtenir le point D. Réduisons à ce moment la résistance à une valeur proportionnelle à l'abscisse de E, etc. On peut continuer ainsi jusqu'en H où l'on éliminera le reste de la résistance.

Dans le cas particulier de la figure 6, l'élimination du dernier tronçon de résistance ne permet plus d'atteindre le courant maximum. Si l'état d'équilibre entre l'effort moteur et l'effort résistant n'est pas atteint le moteur continuera à accélérer et le courant à diminuer jusqu'à l'obtention de cet état d'équilibre.

6. COUPLAGE SERIE - SERIE PARALLELE :

Lorsqu'on dispose de plusieurs moteurs sur un même véhicule, il est possible de brancher tous les moteurs en série de façon que la tension aux bornes d'un moteur soit réduite et que le courant absorbé soit faible, ce qui permet de fonctionner en régime de faible vitesse.

On peut ultérieurement placer les moteurs en série parallèle, voire en parallèle ce qui permet de faire fonctionner les moteurs sous des tensions plus élevées.

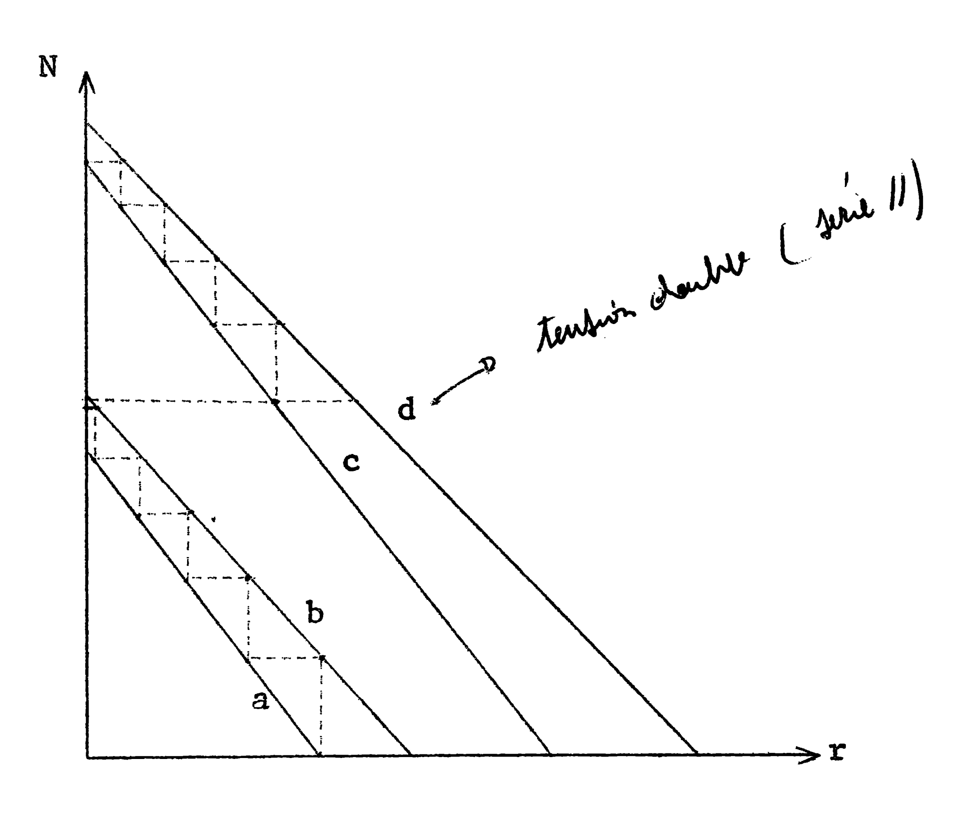


FIGURE 7

Il va de soi que le passage des couplages série - série parallèle doit être exécuté par l'intercalation passagère de résistances.

Un tracé du genre de celui exposé pour les moteurs en série peut être exécuté pour déterminer les valeurs successives des résistances à intercaler dans la manoeuvre.

La figure 7 montre un tracé de l'espèce. Les droites c et d sont relatives au moteur alimenté sous la tension double de celle qui a été utilisée pour le tracé des droites a et b.

Le calcul des droites est exécuté d'une façon analogue.

7. SHUNTAGE DES MOTEURS :

Supposons le régime établi c'est-à-dire l'égalité entre l'effort moteur et l'effort résistant, le train roulera à une vitesse constante.

Si le champ inducteur est affaibli artificiellement, à ce moment la force contre-électromotrice diminue, le courant s'élève à nouveau, le moteur absorbe plus de puissance, cette dernière est en effet proportionnelle au courant absorbé. Le supplément de puissance rompt l'équilibre en faveur du couple moteur et l'engin accélère à nouveau.

Le shuntage doit être appliqué prudemment. Il n'est pas question de brancher en parallèle avec les inducteurs une simple résistance, ce qui provoquerait un trouble brutal dans le fonctionnement du moteur.

Le shuntage des inducteurs doit être réalisé par une self qui permet au courant inducteur d'être dérivé progressivement dans la mesure où le permet la valeur ohmique de la self.

L'abandon du shuntage permet de réduire l'effort moteur et donc la vitesse.

Sur les locomotives de la S.N.C.B., il existe plusieurs valeurs de shuntage tant en position série qu'en position série parallèle ce qui accroit le nombre de vitesses d'équilibre.

8. CALCUL D'UN SHUNTAGE :

Le shuntage est mis en service lorsque le courant absorbé par le moteur est faible en raison de la vitesse élevée de rotation.

La saturation des inducteurs peut alors être négligée, c'est-à-dire que le flux inducteur est proportionnel au courant:

$$\Phi = m\, I$$

En outre la chute de tension dans l'induit R I est négligeable devant la force contre-électromotrice :

$$K\, N\, \Phi$$

Appelons U la tension appliquée au moteur

N la vitesse de rotation du moteur au moment du shuntage

s le coefficient de shuntage, c'est-à-dire le pourcentage du courant d'induit qui ne passe pas par l'inducteur

Φ et Φ' le flux avant et après shuntage

I et I' le courant d'induit avant et après shuntage

De l'équation fondamentale du moteur :

$$U = R\, I + K\, N\, \Phi$$

l'on peut tirer successivement grâce aux hypothèses énoncées ci-dessus :

$$U = K\, N\, m\, I = K\, N\, m\, (1-s)\, I'$$

ce qui donne:

$$I = (1 - s)\, I'$$

$$\text{ou} \quad I' = \frac{I}{1-s}$$

Le couple avant shuntage vaut : $k\, \Phi\, I$ ou $k\, m\, I^2 = C$

Le couple après shuntage vaut : $k\, \Phi' I'$ ou $k\, m\, (1-s) I'^2 = C_s$

ou encore : $C_s = \dfrac{k\, m\, I^2}{1 - s}$

d'où : $$C_s = \frac{C}{1 - s}$$

Si s vaut 0,75, le couple après shuntage est 4 fois plus élevé que le couple avant shuntage.

La formule permet de calculer s quand on se donne le rapport des couples; celui-ci est choisi en fonction des caractéristiques de l'engin et du type d'horaire à choisir.

9. CALCUL D'UN HORAIRE :

Calculons le temps minimum qu'exigera un parcours déterminé. Ce temps constitue l'horaire tendu.

En fait, les horaires réels sont toujours détendus par rapport à l'horaire tendu car d'autres considérations que la performance pure entrent en jeu :

a) L'économie d'énergie

b) L'impossibilité de réduire un retard ce qui troublera le service de toute un ligne pendant toute la journée avec des conséquences désagréables pour les "correspondances" à assurer.

Le lecteur verra en particulier que la détente modérée d'un horaire procure une économie importante d'énergie.

a) Calcul de l'effort de démarrage

Durant la phase d'élimination des résistances de démarrage, les moteurs seront alimentés par un courant compris entre I_{Max} et I_{min} ; on supposera, pour le calcul que les moteurs absorbent d'une façon constante un courant égal à :

$$\frac{I_{Max} + I_{min}}{2}$$

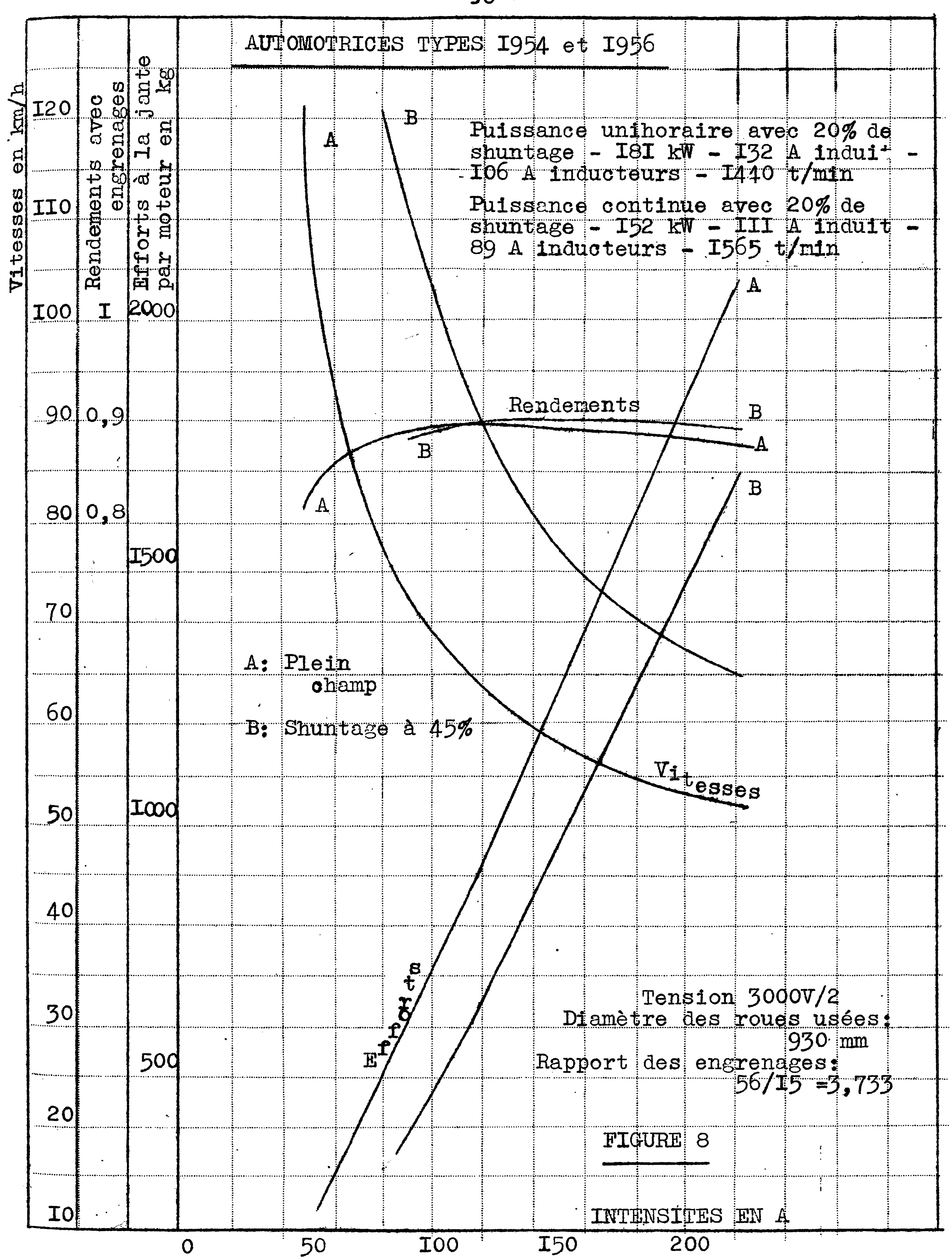
ce qui est justifié par le fait que la courbe couple-moteur est une quasi-droite.

La figure 8 donne les courbes caractéristiques de l'automotrice type 1954.

Le courant moyen de démarrage sera supposé égal à 180 A. L'élimination des résistances est obtenue quand l'engin atteint la vitesse de 55 km/h (courbe A de la figure 8). L'effort au démarrage durant cette période vaut 1620 kg par moteur, soit 6480 kg pour l'ensemble de l'automotrice. L'effort résistance varie en fonction de la charge suivant les formules citées plus haut.

En tablant sur un poids de 110 T réparti également entre les deux véhicules de l'automotrice, l'on peut déduire la résistance au roulement de la voiture de tête et de la voiture de queue.

La résistance au roulement exprimée en kg par T vaut pour la voiture de tête :



AUTOMOTRICES TYPES I954 et I956
Vitesses en km/h
Rendements avec engrenages
Efforts à la jante par moteur en kg
I20
II0
I00
90
80
70
60
50
40
30
20
I0
I
0,9
0,8
2000
I500
I000
500
Puissance unihoraire avec 20% de shuntage - I8I kW - I32 A induit - I06 A inducteurs - I440 t/min
Puissance continue avec 20% de shuntage - I52 kW - III A induit - 89 A inducteurs - I565 t/min
Rendements
Vitesses
Efforts
A: Plein champ
B: Shuntage à 45%
Tension 3000V/2
Diamètre des roues usées: 930 mm
Rapport des engrenages: 56/I5 =3,733
INTENSITES EN A
0
50
I00
I50
200

FIGURE 8

$$R = 0,65 + \frac{13,15 \times 4}{55} + 0,014\ v + \frac{0,004512 \times 10 \times v^2}{55}$$

La résistance au roulement exprimée en kg par T de la voiture de queue vaut :

$$R' = 0,65 + \frac{13,15 \times 4}{55} + 0,014\ v + 0,000639 \times 10 \times v^2$$

La résistance moyenne en kg par T pour l'ensemble de l'automotrice vaut :

$$R_M = 0,65 + \frac{13,15 \times 4}{55} + 0,014\ v + \frac{0,002575 \times 10 \times v^2}{55}$$

$$= 1,6 + 0,014\ v + 0,00047\ v^2$$

Les différentes valeurs de R_M en fonction de la vitesse sont données dans le tableau I.

L'effort moteur moyen par tonne de véhicule en fonction de la vitesse est donné par le tableau II calculé d'après les courbes de la figure 8.

TABLEAU I : VALEURS DE R_M EN FONCTION DE v

Vitesse v	Terme constant	0,014 v	0,00047 v^2	TOTAL
0	1,6	0	0	1,6
55	1,6	0,77	1,43	3,8
60	1,6	0,84	1,70	4,14
70	1,6	0,98	2,30	4,88
80	1,6	1,12	3,00	5,72
90	1,6	1,26	3,81	6,67
100	1,6	1,40	4,70	7,70
110	1,6	1,54	5,69	8,83
120	1,6	1,68	6,77	10,05

TABLEAU II : SANS INTERVENTION DU SHUNTAGE

Vitesse v	Effort correspondant	Effort moyen	Effort moyen par tonne	Effort moyen résistant par T déduit du tableau précédent
0	6480			
		6480	59	2,7
55	6480			
		5590	50,8	3,97
60	4700			
		3750	34,1	4,51
70	2800			
		2350	21,3	5,30
80	1900			
		1630	14,8	6,20
90	1360			
		1240	11,3	7,19
100	1120			
		1060	9,6	8,26
110	1000			
		980	9	9,44
120	960			

N.B. concernant le tableau II :

Les valeurs de la dernière colonne correspondent aux moyennes arithmétiques des efforts résistants calculés au tableau I ; par exemple, l'effort moyen entre 60 et 70 km/h vaut :

$$0,5\ (4,14 + 4,88)$$

Le tableau II montre qu'une automotrice roulant seule ne pourra atteindre en palier la vitesse de 120 km/h car l'effort moteur moyen est inférieur à l'effort résistant moyen pour la vitesse de 115 km/h.

La situation s'améliorera un peu pour un train composé de deux automotrices en raison de la réduction de la résistance moyenne de roulement.

Si l'on utilise le shuntage des moteurs à partir de la vitesse de 90 km/h, le tableau est modifié de la façon suivante :

Vitesse v	Effort correspondant	Effort moyen	Effort moyen par T	Effort résistant par T
90	2700			
		2350	21,3	7,19
100	2000			
		1860	17	8,26
110	1720			
		1490	13,5	9,44
120	1260			

L'automotrice roulant seule atteindra facilement en palier la vitesse de 120 km/h.

b) Justification théorique de la marche des calculs, Unités

L'équation générale de la mécanique est connue :

$$\Sigma F = M \times a$$

où ΣF représente la somme de toutes les forces agissant sur la masse M et a représente l'accélération de la masse M. Exprimons les forces en dynes, la masse en unité C.G.S de masse et les accélérations en cm/s^2 (système C.G.S.). Une force d'une dyne donne à l'unité de masse une accélération de 1 cm/s^2 .

En multipliant les termes de cette équation par 981000, il vient :

981000 dynes donnent à 981000 unités de masse une accélération de 1 cm/s^2 .

Or, 981000 dynes valent une force de 1 kg ; 981000 unités de masse représentent la masse comprise dans un poids de 1 T. Donc, une force de 1 kg donne à la masse pesant 1 T une accélération de 1 cm/s^2 . Il suffit donc de calculer les efforts moteur et résistant par tonne d'engin pour déterminer l'accélération en cm/s^2 .

En fait, une hypothèse simplificatrice a été introduite, on a supposé que le mouvement qui résulte de l'accélération est une translation pure, il n'en est pas ainsi.

L'automotrice comporte également des pièces qui prennent un mouvement de rotation associé au mouvement de translation : les essieux, les moteurs, les engrenages, etc ...

On corrigera empiriquement cette erreur en réduisant de 10% l'accélération qui résulterait de l'application brutale de la formule. Moyennant cette correction, les tableaux précédents peuvent être utilisés pour calculer l'horaire d'un train.

c) Exemple de calcul d'un horaire tendu

Considérons l'automotrice isolée parcourant un trajet de 6 km comportant trois parties : un palier de 2 km, une rampe de 10 °/oo longue de 2 km suivie d'une pente de 5°/oo longue de 2 km.

PREMIERE PHASE : DEMARRAGE

L'effort moteur moyen au démarrage vaut 59 kg/T ; l'effort moyen résistant vaut : 2,7 kg.

L'accélération mesurée en cm/s^2 vaut : 0,9(59 - 2,7) = 50,6.

Le temps nécessaire pour parcourir la première phase du démarrage qui se termine à la vitesse de 55 km/h est de :

$$\frac{55000}{3600 \times 0,506} = 30 \text{ secondes}$$

L'espace parcouru vaut : $\frac{0,506 \times 30^2}{2} = 228$ m

On obtient ainsi le point A du diagramme vitesse-temps de la figure 9.

Le courant absorbé en série (4 moteurs en série) vaut en moyenne 180 A et en série-parallèle (2 groupes de 2 moteurs) 360 A. Le changement du passage série en série-parallèle se fait à 27,5 km/h soit 15 secondes après le départ.

DEUXIEME PHASE : PASSAGE DE 55 A 60 km/h

L'accroissement de vitesse 5 km/h correspond à un accroissement de 1,4 m/s.

L'accélération moyenne vaut : 0,9 (50,8 - 3,97) = 42,5 cm/s^2

Le temps nécessaire pour franchir cette deuxième phase s'élève à :

$$\frac{1,4}{0,425} = 3,3 \text{ secondes}$$

L'espace parcouru est de : $\frac{57500}{3600} \times 3,3 = 53$ m

Le point B du diagramme vitesse-temps est ainsi atteint. Il est situé à une distance de 281 m de l'origine. Le courant moyen absorbé est de 2 x 150 = 300 A.

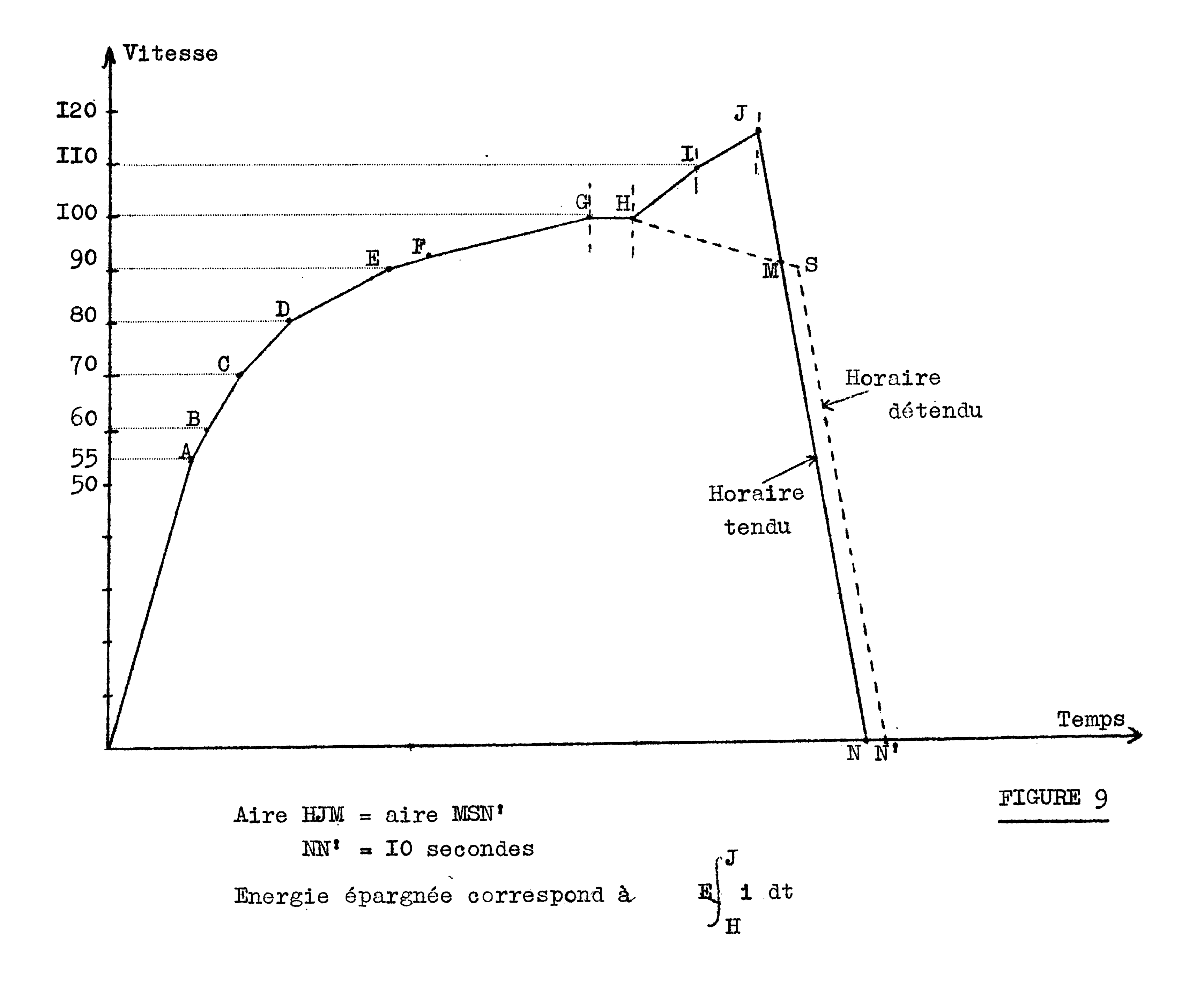

Vitesse
I20
II0
I00
90
80
70
60
55
50
A
B
C
D
E
F
G
H
I
J
M
S
N
N'
Horaire détendu
Horaire tendu
Temps
Aire HJM = aire MSN'
NN' = I0 secondes
Energie épargnée correspond à $E \int_{H}^{J} 1\ dt$

FIGURE 9

TROISIEME PHASE : PASSAGE DE 60 A 70 km/h

L'accroissement de vitesse est de 10 km/h soit 2,8 m/s. L'accélération moyenne est de :

$$0,9 \frac{(34,1 - 4,51)}{1} = 27 \text{ cm/s}^2$$

Le temps nécessaire est de : $\frac{2,8}{0,27} = 10,4$ s

L'espace parcouru est de $\frac{65000}{3600} \times 10,4 = 188$ m

Le point C du diagramme est obtenu : il est situé à 281 + 188 = 469 m de l'origine.

Le courant moyen absorbé est de : 2 × 115 A = 230 A

QUATRIEME PHASE : PASSAGE DE 70 A 80 km/h

L'accroissement de vitesse est de 2,8 m/s.

L'accélération moyenne vaut : 0,9 (21,3 - 5,1) = 14,5 cm/s^2.

Le temps nécessaire est de : $\frac{2,8}{0,145} = 19,3$ s

L'espace parcourue est de : $\frac{75000}{3600} \times 19,3 = 402$ m

Le point D atteint est situé à 469 + 402 = 871 m du point de départ.

Le courant moyen absorbé est de : 2 × 85 = 170 A

CINQUIEME PHASE : PASSAGE DE 80 A 90 km/h

L'accélération est de 0,9(14,8 - 6,2) = 7,8 cm/s^2

Le temps nécessaire est de : $\frac{2,8}{0,078} = 36$ secondes

L'espace parcouru est de : $\frac{85000}{3600} \times 36 = 850$ m

Le point E atteint est situé à 871 + 850 = 1721 m du point de départ.

Le courant moyen absorbé est de : 2 × 70 = 140 A

SIXIEME PHASE : ACHEVEMENT DU TRONÇON EN PALIER :

Le tronçon en palier qui comporte deux km n'est pas encore totalement parcouru car il reste 279 m avant d'aborder la rampe de 10°/₀₀.

Prenons une hypothèse raisonnable. Admettons à titre de première approximation que l'accélération soit constante et égale à celle qui règne à la vitesse de 90 km/h.

L'accélération vaudra : $0,9 \; \frac{(14,8-6,2)+(11,3-7,19)}{2}$

soit 5,7 cm/s^2

La vitesse à l'extrémité du palier vaudra : (90+x) km/h et appelons t le temps nécessaire pour parcourir les 279 m. La relation déduite de la mécanique élémentaire est la suivante:

$$279 = \frac{90000}{3600} t + \frac{0,057 \times t^2}{2}$$

ce qui donne la valeur de t : t = 11 s

La vitesse instantanée au pied de la rampe vaudra :

90 km/h + (11 × 0,057)×3,600 = 92,3 km/h

Le courant absorbé vaut : 2 × 60 A = 120 A

Le point F est situé à 2000 m du point de départ au pied de la rampe de 10°/₀₀.

SEPTIEME PHASE : PARCOURS DE LA RAMPE DE 10°/₀₀

La présence de la rampe de 10°/₀₀ a pour effet d'ajouter une résistance supplémentaire au roulement de 10 kg/T. On voit de suite que la vitesse de l'automotrice va diminuer, puisque l'effort résistant dépasse de loin l'effort moteur.

Pour continuer à accélérer, il va falloir shunter les moteurs et utiliser les données du tableau relatif au shuntage. L'effort moteur et l'effort résistant entre les vitesses de 90 et 100 km/h valent respectivement 21,3 et 17,2kg (en y comprenant l'effet dû à la rampe).

L'accélération vaut : 0,9 × 4,1 = 3,7 cm/s^2.

Le temps nécessaire pour atteindre la vitesse de 100 km/h se calcule suivant les mêmes principes.

Différence de vitesse exprimée en m/s :

$$\frac{(100 - 92,3) \times 1000}{3600} = 2,16$$

Temps : $\frac{2,16}{0,037} = 60$ s

Espace parcouru : $\frac{(100 + 92,3)}{2 \times 3600} \times 60 = 1602$ m

Le point G du diagramme est situé à 3602 m de l'origine.

Le courant absorbé vaut : 2 × 115 = 230 A.

HUITIEME PHASE : ACHEVEMENT DU TRONCON EN RAMPE

Il reste à parcourir 398 m sur la rampe de 10°/₀₀. Cette distance sera franchie à une vitesse voisine de 100 km/h. En effet, l'effort moteur à 105 km/h vaut 17 kg/T, il est inférieur à l'effort résistant à cette vitesse (8,26 + 10).

Etant donné la faible longueur du tronçon, l'erreur sera faible si l'on considère qu'il sera parcouru à la vitesse uniforme de 100 km/h.

Temps nécessaire : 398 : $\frac{100000}{3600}$ = 14,5 secondes.

Le point H du diagramme est situé à 4 km du point de départ, à l'extrémité de la rampe.

Le courant absorbé vaut : 2 × 105 = 210 A

NEUVIEME PHASE : PARCOURS EN PENTE DE 5°/₀₀ - PASSAGE DE 100 km/h ~~A~~ 110 km/h

La présence de la pente va accroître l'effort moteur de 5 kg/T.

Supposons que l'on laisse en service le shuntage des moteurs.

L'accélération est de : 0,9(17 + 5 - 8,26) = 12,5 cm/s^2

Le temps nécessaire est de : $\frac{2,80}{0,125} = 22,4$ secondes

L'espace parcouru est de : $\frac{105000}{3600} \times 22,4 = 653$ m

Le point I du diagramme représente le point atteint situé à 4653 m de l'origine.

Le courant absorbé vaut : 2 × 95 = 190 A.

DIXIEME PHASE : PASSAGE DE 110 A 120 km/h

Considérons le passage de la vitesse de 110 à 120 km/h. L'accélération vaut : 0,9 × 9,06 = 8,2 cm/s^2.

Le temps nécessaire pour atteindre cette vitesse vaut :

$$\frac{2,80}{0,082} = 34,2 \text{ secondes}$$

L'espace parcouru vaut : $\frac{115000}{3600} \times 34,2 = 1090$ m.

A ce moment l'espace total parcouru atteint 4653 + 1090 = 5743 m ce qui ne laisse plus qu'une distance de 257 m pour l'exécution du freinage, ce qui est beaucoup trop peu.

Il faudra donc couper le courant avant d'atteindre la vitesse de 120 km/h. Admettons que le freinage soit exécuté au moyen d'une décélération de 0,8 m/s^2 et supposons en première approximation (quitte à revenir ultérieurement sur cette hypothèse que l'on freine à partir de la vitesse de 115 km/h : point J du diagramme).

Le temps de freinage et l'espace parcouru en freinant sont donnés par les deux relations élémentaires :

$$\frac{115000}{3600} = 0,8 \times t \qquad \text{et} \qquad e = \frac{0,8\ t^2}{2}$$

Il en résulte que le temps et la distance de freinage valent 40 secondes et 640 m. La distance IJ vaut alors :

$$2000 - (653 + 640) = 707 \text{ m}$$

Admettons que l'effort moteur et l'effort résistant valent respectivement :

$$\frac{17 + 13,5}{2} \quad \text{et} \quad \frac{8,26 + 9,44}{2}$$

et en ajoutant l'effort moteur dû à la pente, l'on déduit une accélération résiduelle de 10 cm/s^2. La vitesse maximum atteinte au début du freinage peut être calculée comme suit à partir du temps t :

$$\frac{110000}{3600}\, t + \frac{0,1 \times t^2}{2} = 707 \quad \text{d'où } t = 22 \text{ secondes}$$

La vitesse vaut : 110 + 0,1 × 22 × 3,6 = 118 km/h. L'on voit qu'en estimant la vitesse de freinage à 115 km/h, une erreur a été commise, le lecteur rectifiera facilement en

recommençant les calculs avec cette nouvelle base.

Le temps total s'élève à : 268,9 secondes.

La vitesse moyenne est de : $\frac{6000}{268,9} \times 3,6 = 80$ km/h.

d) Effets d'une réduction de vitesse

L'horaire tendu exige une grande consommation d'énergie. On peut réduire celle-ci, par exemple en supprimant toute consommation sur le parcours en pente.

Si on supprime toute alimentation des moteurs dès que la pente est abordée, la vitesse va être réduite. En effet, l'effort moteur 5 kg/T dû à la pente est inférieur à l'effort résistant qui vaut 7,7 kg/T à la vitesse de 100 km/h.

La décélération vaudra : $0,9 \times 2,7 = 2,4$ cm/s^2.

La durée du temps de freinage sera également moindre ; supposons qu'il corresponde à une vitesse de 95 km/h ce qui donne un temps de 33 secondes et une distance de 435 m. La distance à parcourir sans prélèvement d'énergie avant le freinage est de 1565 m.

Calculons le temps nécessaire pour parcourir ces 1565 m en supposant une vitesse initiale de 100 km/h et une décélération de 0,024 m/s^2.

La vitesse finale v vaut et peut se déduire des 2 équations:

$$v = 28 - 0,024\ t$$

$$\frac{v + 28}{2} \times t = 1565 \text{ m}$$

On en déduit t = 62 secondes et v = 95,4 km/h.

L'hypothèse de départ : vitesse de freinage de 95 km/h est justifiée.

L'allongement du temps de parcours est de 10 secondes. L'économie réalisée vaut :

$$3000 \times \frac{(190 \times 22,4 + 175 \times 62)}{3600 \times 1000} = 6,75 \text{ kWh}$$

e) Influence de l'horaire sur la consommation d'énergie

L'exemple précédent montre qu'une détente de l'horaire de 10 secondes permet de réaliser une économie de 6,75 kWh.

L'influence de l'allongement d'un horaire est d'autant plus marquée que le trajet est plus court. Un accroissement de la vitesse d'un express est supportable tandis que l'influence de cet accroissement est énorme sur un train omnibus. Dans un horaire à arrêts fréquents, il faut tenir compte en effet des pertes dues aux résistances de démarrage et à l'énergie perdue dans le freinage.

Si l'on considère une automotrice pesant 110 T freinée respectivement à 100 ou à 80 km/h, l'énergie absorbée par le freinage vaut en kgm :

$$\frac{1}{2} \times \frac{110000}{9,81} \times \left(\frac{100000}{3600}\right)^2 \quad \text{et} \quad \frac{1}{2} \frac{110000}{9,81} \times \left(\frac{80000}{3600}\right)^2$$

soit ~~86240000~~ 43120000 et ~~54230000~~ 27115000 kgm ou ~~23 kWh~~ 11,5 et ~~15,5 kWh~~ 7,75

f) Remarque importante pour l'exécution rapide des calculs

En pratique, il faut mener de front les calculs des diverses phases de démarrage, la représentation graphique du diagramme (v , t) et graduer cette courbe en fonction des espaces parcourus afin d'éviter les erreurs lors des variations de profil le long de la ligne.

Le diagramme v, t détermine une surface comprise entre la courbe et l'axe du temps, cette surface vaut l'intégrale :

$$\int v \, dt$$

elle représente l'espace parcouru.

Ce dernier est constant quel que soit l'horaire. L'on doit donc tracer sur le même calque les divers horaires relatifs à un même parcours. La correspondance des surfaces doit être constante. Des erreurs de distraction peuvent être aisément évitées. On portera sur ce diagramme à une échelle convenable, le diagramme I, t qui permet de calculer l'énergie consommée par le diagramme : $E \int i \, dt$. Il faut noter toutefois que pour la première phase du démarrage sur résistances, l'intensité absorbée est la moitié du courant absorbé dans la deuxième partie de l'élimination des résistances (marche série et marche parallèle).

Le diagramme de la figure 9 montre un exemple de diagramme v , t où deux variantes ont été prévues.

On peut, il va de soi modifier à volonté l'instant de coupure du courant, par exemple en G et calculer l'allongement de l'horaire et l'économie d'énergie correspondante.

En exploitation ferroviaire, un gain de temps peut être obtenu moyennant un aménagement judicieux des portes ce qui permet d'accélérer le débarquement et l'embarquement des voyageurs. Les plateformes donnant sur les portes seront vastes, les quais seront surélevés, etc ...

L'horaire pourra alors être détendu tout en permettant une vitesse économique élevée. Il en résultera une grande économie d'énergie.

La figure 10 permet de se rendre compte de la consommation d'énergie en fonction de la vitesse et de la distance entre arrêts.

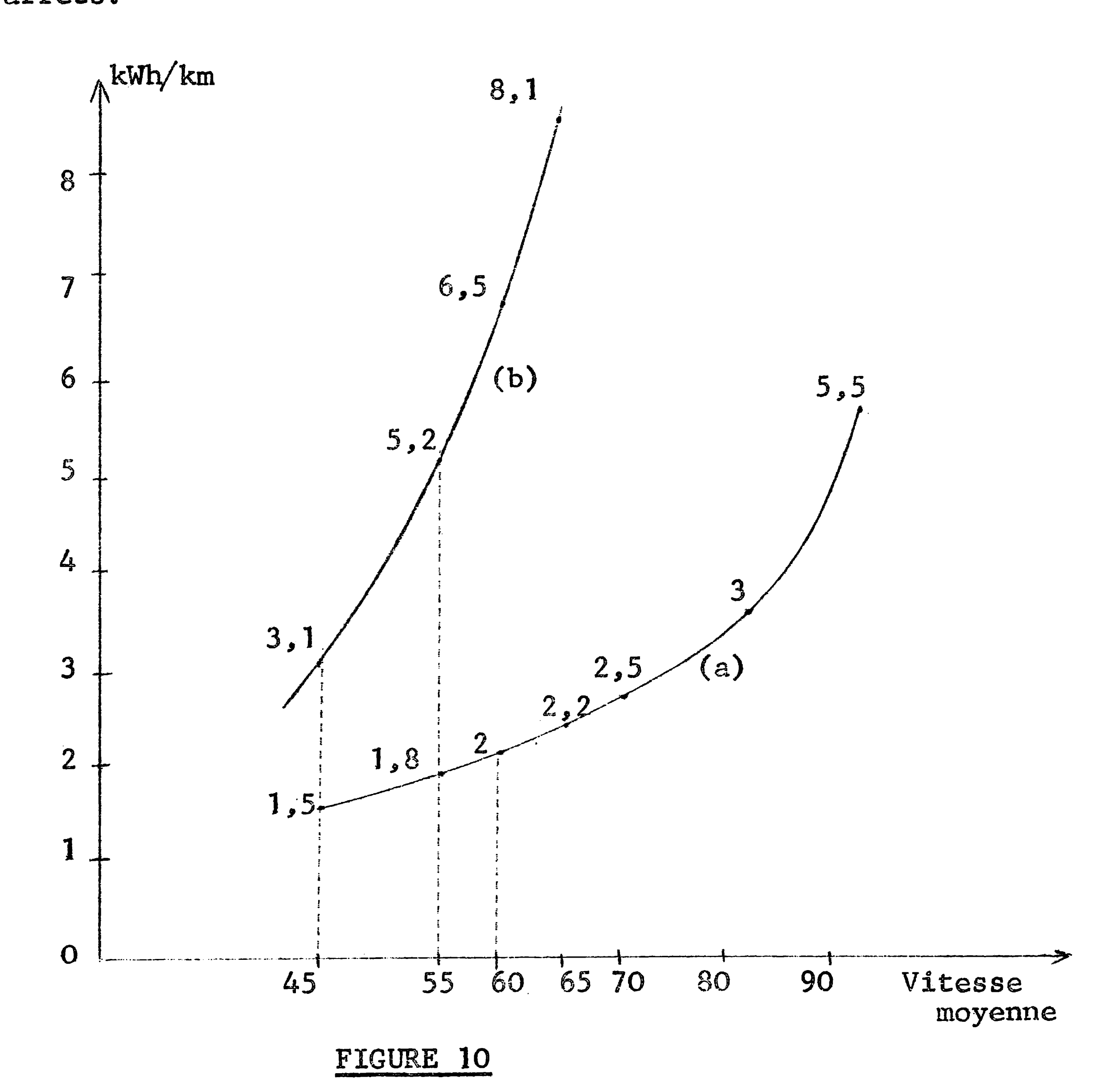


FIGURE 10

La courbe a donne la consommation d'énergie par train-km en fonction de la vitesse lorsque la distance entre arrêts est de 8000 m.

La courbe b donne la consommation d'énergie par train-km en fonction de la vitesse moyenne lorsque la distance entre arrêts vaut 2400 m.

Ces valeurs valent pour une automotrice double série 1953 de la S.N.C.B.

---

§ 3 . LE DEMARRAGE AUTOMATIQUE DES TRAINS

1. PRINCIPE :

En examinant l'influence de l'accélération sur l'énergie consommée pour effectuer un trajet déterminé en un temps donné l'on constate qu'une économie d'énergie importante peut être obtenue en réalisant une accélération élevée.

On se rendra compte de ce fait par les deux considérations suivantes :

a) L'influence du rapport d'engrenages comme il a déjà été exposé antérieurement

b) La possibilité de réaliser de plus longues dérives c'est-à-dire de laisser rouler le train sur son erre, de rouler sans consommation d'énergie

Il convient donc d'exiger du conducteur du train un démarrage immédiat et énergique.

Afin d'éviter que le conducteur ne soit tenté d'appliquer aux moteurs un couple qui provoquerait l'emballement de ceux-ci l'on a été conduit à imaginer le démarrage automatique.

Le conducteur recevant l'ordre de départ met les moteurs sous tension connectés en série avec des résistances de démarrage. Ces dernières sont ensuite éliminées automatiquement sans aucune intervention du conducteur au moyen de contacteurs d'élimination des résistances.

Le courant de traction restera toujours compris entre I_{Max} et I_{min} jusqu'à l'élimination des résistances.

2. DISPOSITION APPLIQUEE SUR UNE AUTOMOTRICE :

Le principe ci-dessus peut être appliqué aux automotrices dont le démarrage est toujours identique à lui-même (au poids des voyageurs et des bagages près).

L'on peut donc choisir un I_{moyen} tel que I_{Max} ne provoque pas d'emballement des moteurs ni des accélérations incompatibles avec le confort des voyageurs.

Les contacteurs HT d'élimination des résistances ont une pièce mobile de contact solidaire d'une came calée sur un arbre à cames. La rotation de l'arbre à cames assure donc le fonctionnement impeccable des contacteurs dans l'ordre voulu.

L'arbre à cames peut être commandé électriquement (solution ACEC sur le matériel SNCB) ou pneumatiquement (solution du Métro à Paris). L'arbre à cames se déplace d'un angle constant chaque fois que son moteur d'entraînement est alimenté électriquement ou pneumatiquement. Le moteur d'entraînement est alimenté à l'intervention d'un relais appelé "relais d'accélération". Le courant de traction des moteurs de l'automotrice traverse l'enroulement du relais d'accélération. Aussi longtemps que le courant de traction dépasse la valeur I_{min}, l'armature du relais coupe l'alimentation du moteur d'entraînement de l'arbre à cames. Dès que le courant de traction tombe en-dessous de cette valeur, l'armature du relais retombe ce qui met sous tension le moteur d'entraînement de l'arbre à cames.

Des dispositifs spéciaux de coupure empêchent que l'arbre à cames effectue consécutivement deux déplacements angulaires. Il suffit de prévoir un dispositif de coupure dans l'alimentation du moteur d'entraînement. Des dispositifs spéciaux sont également prévus pour que ce moteur effectue exactement le déplacement prévu.

Le lecteur intéressé par ces problèmes lira les revues ACEC de 1955 et 1956.

3. DEMARRAGE AUTOMATIQUE D'UNE LOCOMOTIVE :

Le principe énoncé ci-dessus peut être appliqué sur les locomotives moyennant une modalité importante. Il serait en effet impossible d'imposer à la locomotive un programme de démarrage indépendant de la charge remorquée. Un effort moyen de 16 T donne à la locomotive remorquant une faible charge ou circulant à vide, une accélération incompatible avec le confort des voyageurs et du conducteur.

Le relais d'accélération doit être pourvu de deux enroulements :

a) l'enroulement HT parcouru par le courant de traction

b) l'enroulement BT de réglage de l'effort

L'enroulement BT produira des ampères tours dont le nombre peut être réglé grâce à une résistance variable à la disposition du conducteur. Le relais d'accélération mettra sous tension le moteur d'entraînement de l'arbre à cames non plus pour une valeur constante du courant de traction mais pour une valeur qui sera fonction du courant BT.

Le conducteur peut à son gré, augmenter ou diminuer l'effet de l'enroulement BT en insérant la résistance variable en série

avec cet enroulement en manoeuvrant un levier, dont la position graduée en Tonnes d'effort aux jantes de la locomotive. Le conducteur dispose donc d'un moyen très simple de choisir le courant moyen de démarrage.

Il va de soi que le démarrage effectué, c'est-à-dire après l'élimination des résistances de démarrage, la position du levier d'effort est sans influence sur l'effort de traction.

Les locomotives anciennes n'étaient pas équipées de dispositif de démarrage automatique. Le conducteur règle l'accélération comme le fait un conducteur de tramway ; il en résultait que, fréquemment, il oubliait d'éliminer une partie de la résistance qui s'échauffait et mettait le feu à la locomotive.

4. CAS DES RESEAUX ALIMENTES EN 16 2/3 OU 50 Hz :

Dans les réseaux équipés en courant alternatif, la commande manuelle peut être maintenue car le conducteur dispose d'un appareil qui élève la tension aux bornes des moteurs de traction. Des prises spéciales prévues sur le transformateur d'alimentation permettent d'appliquer aux moteurs une tension croissante.

5. PATINAGE D'UN ESSIEU - EMBALLEMENT D'UN MOTEUR :

Le couple maximum qu'il est possible de faire développer par un moteur dépend de l'adhérence c'est-à-dire du coefficient de frottement entre roue et rail.

Si en raison d'une circonstance fortuite, le coefficient de frottement diminue (présence d'une tâche d'huile sur le rail) ou si le couple moteur augmente brusquement (en raison d'une élévation subite de la tension de la ligne), il se produit un glissement des roues de l'essieu sur les rails. Si la cause qui a provoqué l'incident est passagère et si le moteur est alimenté d'une façon stable, l'incident est sans gravité.

Si la cause qui a provoqué l'incident subsiste, le moteur continue à tourner de plus en plus vite (il fonctionne comme un moteur série à vide) finalement le sertissage est détruit par la force centrifuge et les barres d'induit sautent des encoches et vont s'écraser sur le stator.

Lorsque deux moteurs (à fortiori quatre) sont alimentés en série, le phénomène est extrêmement dangereux.

Considérons deux moteurs identiques alimentés en série qui attaquent chacun un essieu tournant à la même vitesse. ./.

La tension du réseau se répartit également sur chacun des moteurs avant le patinage.

Supposons maintenant que l'un des moteurs tourne plus vite en raison d'une cause purement fortuite qui va disparaître immédiatement.

La force contre-électromotrice du moteur qui tourne plus vite augmente, le courant total absorbé diminue.

La force contre-électromotrice du moteur qui continue à tourner à la même vitesse diminue en raison de la réduction du flux provoquée par la réduction de courant.

Chaque moteur n'est plus alimenté à la moitié de la tension du réseau. Le moteur qui a tourné le plus rapidement est alimenté à une tension plus élevée. La caractéristique (vitesse-courant) d'un moteur est fonction de la tension appliquée. Le moteur qui a tourné plus vite, tend à tourner de plus en plus vite. Il faut donc un dispositif de sécurité limitant très vite l'accroissement du phénomène de patinage.

6. DISPOSITIF DE DETECTION DU PATINAGE :

Considérons deux moteurs en série et plaçons un relais R comme l'indique la figure 11.

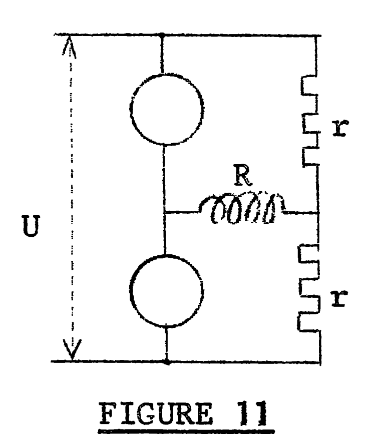


FIGURE 11

Si les moteurs sont alimentés à la tension U/2, il n'y a pas de courant dans le relais R. Si par contre, l'un des moteurs est alimenté à une tension supérieure à celle de l'autre moteur, il circule un courant dans le relais R grâce aux deux résistances r.

Ce relais permet d'alerter le conducteur pour lui faire couper le courant.

A la S.N.C.B. le relais provoque la régression du dispositif d'élimination des résistances. Celles-ci sont remises progressivement en service jusqu'à ce que s'arrête le déséquilibre des tensions des moteurs.

En effet, dès que les moteurs tournent à la même vitesse le dispositif automatique d'élimination des résistances reprend sa progression.

Ce dispositif est très efficace car il a permis de supprimer radicalement tout emballement des moteurs. L'emballement d'un moteur en traction électrique provoque le calage du moteur dans la carcasse; le dépannage d'une locomotive avariée est alors très long car il exige la mise en oeuvre d'un chariot spécial destiné à être placé sous l'essieu calé.

---

§ 4 . LE FREINAGE PAR RECUPERATION

1. GENERALITES :

Ce freinage électrique permet à la locomotive d'exercer un effort de retenue sur le convoi remorqué. Ce frein n'est pas destiné à provoquer l'arrêt du train. On évite ainsi de multiples inconvénients dûs au freinage automatique classique:

1) usure importante du sabot de frein
2) échauffement des semelles de frein et des bandages des roues et lâchage des bandages
3) récupération d'une quantité non négligeable d'énergie qui, autrement, devrait être fournie par la sous-station

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Le freinage par récupération est basé sur la réversibilité des moteurs électriques à courant continu qui peuvent fonctionner indifféremment comme moteurs ou génératrices. En traction, les moteurs de la locomotive transforment l'énergie électrique qui leur est fournie par la ligne d'alimentation en énergie mécanique utilisée pour la remorque des trains. En freinage par récupération, ces mêmes moteurs fonctionnent en génératrices et absorbent l'énergie dûe à la poussée exercée par le convoi dont il faut réduire la vitesse en la transformant en énergie électrique qui est renvoyée sur la ligne d'alimentation.

Dans le cas particulier de sous-stations équipées de redresseurs à vapeur de mercure unidirectionnels, comme c'est le cas en Belgique, l'énergie électrique récupérée ne peut être utilisée que par un autre convoi fonctionnant en traction sur la même section et absorbant cette énergie. Il n'est donc pas possible de renvoyer l'énergie récupérée à la centrale d'alimentation via la sous-station de traction. La densité du trafic sur la ligne rendra possible le fonctionnement du freinage par récupération. On estime que seront assez rares les cas où la densité du trafic ne permettra pas de remplir cette condition.

La valeur du courant débité en récupération n'est limitée que par la capacité des moteurs de traction. L'utilisation de ce système de freinage n'est possible que si la caténaire est sous tension.

Considérons un moteur série alimenté à la tension U dans une locomotive fonctionnant en traction. Sur la figure sont indiqués les sens de la f.c.e.m. E, du courant I, de la vitesse N du couple moteur C. Le courant vient donc de la ligne vers la

locomotive. Ceci constitue le fonctionnement en moteurs.

Lors de la marche en récupération, le moteur tournant en génératrice dans le même sens que précédemment doit renvoyer du courant de la locomotive vers la ligne. Le courant I doit donc changer de sens, mais le flux, donc le champ magnétique doit conserver le même sens pour permettre l'auto-excitation lors du fonctionnement en génératrice à partir du flux rémanent.

Le courant I changeant de sens, pour que le champ H conserve le même sens, il est nécessaire d'inverser les connexions des inducteurs. Comme le flux et la vitesse n'ont pas changé de sens, la f.e.m. n'a pas non plus changé de sens et la f.e.m. du moteur est devenue la f.e.m. de la génératrice.

Le couple du moteur étant fonction du courant et du flux, C est égal à K(Φ, I), comme un seul de ces éléments a changé de sens, le couple moteur est devenu un couple de freinage ou couple antagoniste. C est égal à kΦI kgm.

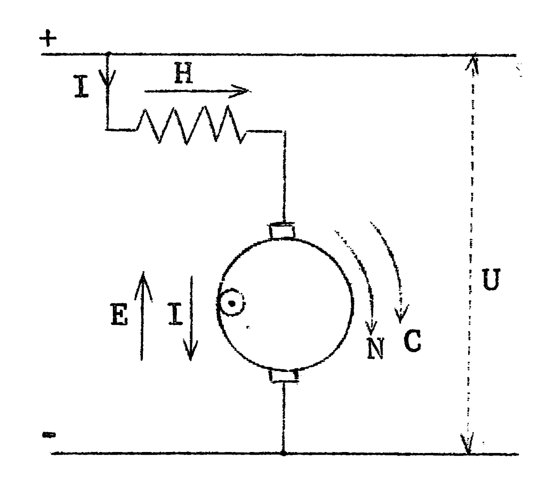


FIGURE 12

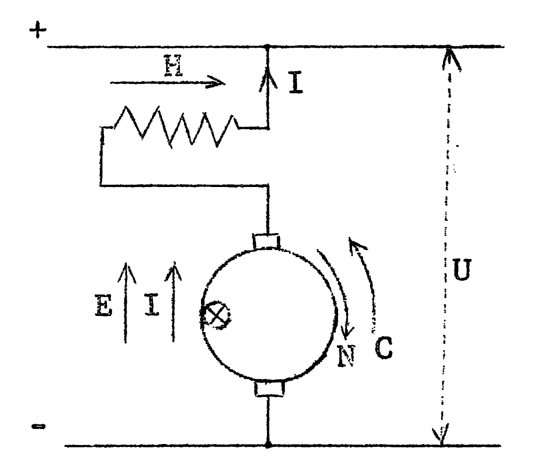


FIGURE 13

E = f.c.e.m.

I = courant

N = vitesse

C = couple

H = champ

3. INSTABILITE DE LA GENERATRICE SERIE :

Le courant I débité par la génératrice série est donné par la relation :

$$I = \frac{E - U}{R} \qquad (1)$$

E = f.e.m. de la génératrice

U = tension de la ligne

R = résistance totale du circuit

Dans un réseau de traction, la tension de la ligne U subit fréquemment des variations importantes ; pour une ligne à tension nominale de 3000 volts, la tension réelle peut varier entre 2000 et 3600 volts.

Supposons que U augmente brusquement et dépasse E. D'après la relation (1), le courant et le flux changent de sens. Il s'en suit que le couple conserve son sens et que la machine reste génératrice, mais la f.e.m. de l'induit change de sens et devient - E'. On a alors affaire à deux sources (la ligne et la génératrice) connectées en série et dont les tensions s'ajoutent.

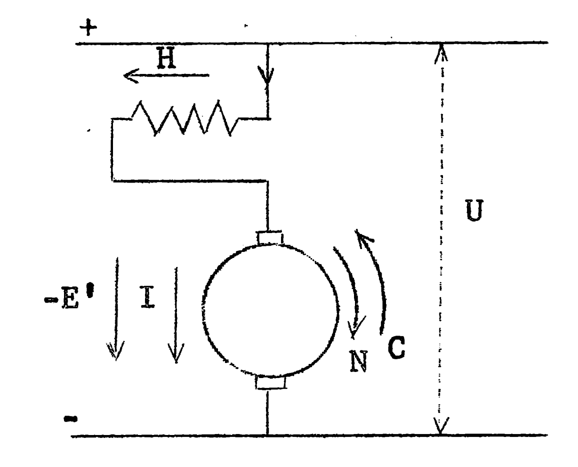


FIGURE 14

Le courant I donné par la relation :

$$I = \frac{-E' - U}{R}$$

serait énorme. Afin de l'éviter, les protections vont entrer en ligne et séparer les génératrices de la ligne, supprimant de ce fait le freinage.

Considérons une génératrice série débitant un courant I et supposons un accroissement de courant I + ΔI. Cette augmentation ΔI va produire un accroissement de flux, donc de la f.e.m. E.

La tension aux bornes U étant pratiquement fixée par la tension en ligne, tout accroissement de E aura comme conséquence immédiate un accroissement de I.

Le courant continuera à augmenter en provoquant un freinage de plus en plus brutal jusqu'à ce que les protections interviennent et séparent la génératrice de la ligne, supprimant brusquement le freinage.

Il en résulte que pour réaliser le freinage par récupération dans de bonnes conditions, il faut séparer l'induit des inducteurs et exciter les inducteurs par une source séparée. De cette façon :

1) le flux gardera constamment le même sens
2) le flux gardera une valeur indépendante du courant dans l'induit

4. FONCTIONNEMENT AVEC EXCITATION SEPAREE :

Lors de la marche en récupération, les moteurs de traction qui fonctionnent normalement à excitation série sont transformés par une modification convenable de leurs connexions en génératrices à excitation séparée et leurs inducteurs sont alimentés par un groupe moteur-génératrice.

Dans le schéma ci-après, M représente les 4 induits des moteurs de traction et H les inducteurs.

Le groupe Moteur-génératrice est mis en marche et on fait varier, au moyen du rhéostat d'excitation de la génératrice le courant qu'il débite dans les inducteurs des moteurs de traction de manière que la f.e.m. développée par les induits de ce moteur atteigne une valeur légèrement supérieure à celle de la tension en ligne $E > U$. Par la fermeture du contacteur CL, l'induit est alors mis en opposition avec le réseau dans lequel il débite un courant que l'on fait varier en modifiant convenablement (par la manoeuvre du rhéostat d'excitation) l'intensité du courant débité par la génératrice à travers les inducteurs des moteurs de traction ; de cette manière, l'effort de freinage correspondant permet de maintenir ou de ramener la vitesse du convoi à la valeur prescrite.

Au lieu de grouper les 4 induits en série, on peut les grouper en deux groupes série-parallèle. Les induits des moteurs de traction sont couplés :

1) en série lorsque la locomotive roule à faible vitesse. Il faut en effet, pour qu'il y ait freinage, que la somme des tensions engendrées dans les induits des moteurs dépasse la tension de la caténaire
2) en parallèle lorsque le train roule à grande vitesse

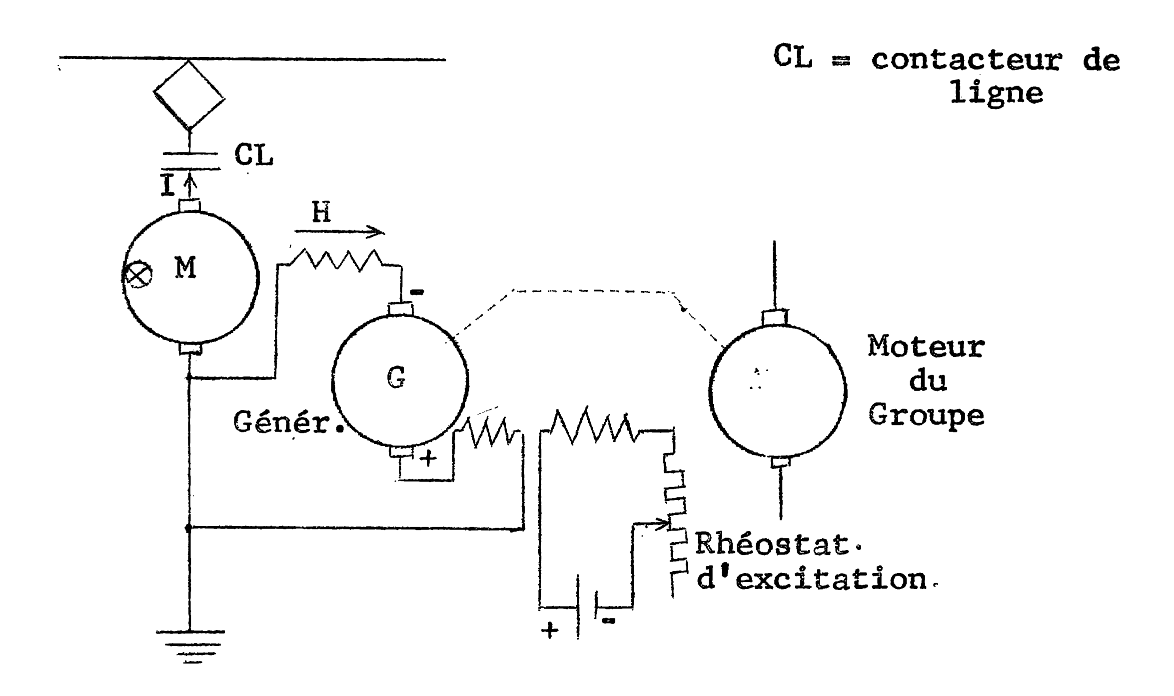


FIGURE 15

5. DISPOSITIFS DE STABILISATION :

Le système serait instable si la tension de la caténaire variait brusquement, pour les raisons suivantes :

1) une variation de tension de la caténaire provoquerait une variation du courant fourni par les moteurs donc une grande modification de la valeur du couple de freinage

2) une variation de tension de la caténaire qui alimente le moteur du groupe moteur-générateur entraînerait une variation de vitesse du groupe donc du courant d'excitation des moteurs travaillant en génératrice.

Un enroulement anti-compound parcouru par le courant produit par les moteurs de traction limite les amplitudes de variation du couple de freinage.

Un dispositif spécial constitué par un transformateur inductif réduit momentanément les variations de vitesse du groupe moteur-génératrice de façon que le conducteur puisse intervenir en réglant la résistance d'excitation indépendante de la génératrice.

I. Excitation anticompound (figure 16)

La génératrice du groupe de récupération est munie d'un enroulement d'excitation anticompound (série antagoniste) parcouru par le courant récupéré I. Le flux qu'il développe est en opposition avec celui des enroulements a (série) et b(indépendant). Le courant débité par la génératrice dans les inducteurs du moteur-génératrice varie en sens inverse de I (courant récupéré). Le courant produit par les moteurs de traction est assez indépendant de la tension de la caténaire.

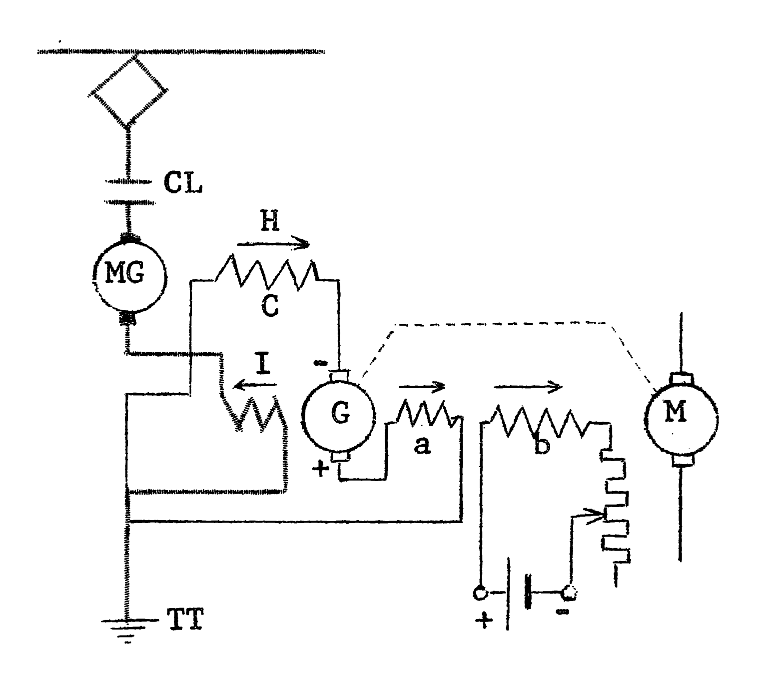


FIGURE 16

II. Emploi d'un transformateur inductif (figure 17)

L'excitation du moteur d'entraînement M du groupe de récupération est assuré au moyen de deux enroulements :

1) un enroulement série S monté en série avec l'induit

2) un enroulement shunt Sh monté en série avec l'enroulement secondaire d'un transformateur dont le primaire est traversé par le courant d'alimentation du moteur du groupe. L'induction mutuelle des enroulements de ce transformateur a pour effet de s'opposer à la variation de vitesse du groupe de récupération lorsque la tension en ligne varie brusquement.

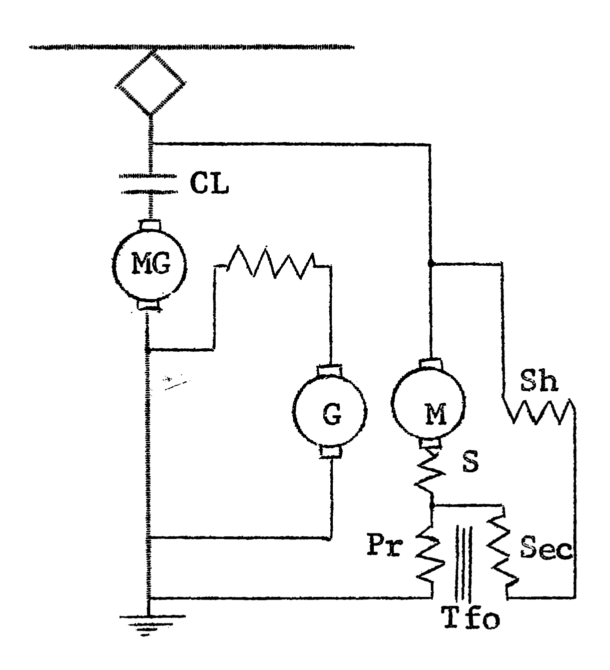


FIGURE 17

Le moteur du groupe aura donc une vitesse qui fluctuera moins vite que ne le fait la tension d'alimentation.

On réalise une "temporisation" de la variation de vitesse du groupe.

§ 5 . INSTALLATIONS FIXES EN COURANT CONTINU

1. NOMBRE ET EMPLACEMENT DES SOUS-STATIONS :

Considérons une ligne dont le trafic à électrifier est connu. Il est possible de calculer l'énergie qui sera consommée par les trains. Cette énergie augmentée des pertes en ligne doit être fournie par les sous-stations. L'on voit immédiatement qu'il existe une infinité de solutions au problème du nombre et de l'emplacement et donc de la puissance individuelle des sous-stations. Le technicien doit rechercher la solution la plus économique qui soit encore suffisamment souple pour l'exploitation du réseau.

Considérons par exemple la ligne Bruxelles-Luxembourg longue d'environ 230 km. Réduire à deux le nombre de sous-stations revient à admettre qu'un train puisse être alimenté à une tension suffisante à une distance de 77 km, ce qui postulerait une caténaire d'un prix prohibitif (cuivre, poteaux, fondations). Installer par contre un très grand nombre de sous-stations pour obtenir une caténaire très légère serait aussi très coûteux. Entre ces deux solutions extrêmes il existe une solution optimum au point de vue de l'exploitation. Il est avantageux d'installer une sous-station dans une grande gare ce qui permet d'alimenter plusieurs lignes et de faciliter les manoeuvres de coupure et de rétablissement de courant à l'occasion d'un accident. En outre, le fait d'alimenter plusieurs lignes réduit les dépenses d'électrification : exemple, l'électrification de la ligne Charleroi-Namur ne nécessite pas la construction d'une sous-station supplémentaire car les sous-stations de Charleroi et de Namur existaient déjà en raison de l'électrification des lignes Bruxelles-Charleroi et Bruxelles-Luxembourg; si l'on électrifie Namur-Liège, les sous-stations de Namur et Ans (Liège) réduiront à peu de choses les dépenses à prévoir pour les sous-stations, etc ... Il faut également noter qu'un déplacement d'une sous-station de 2 à 5 km autour du point idéal qui serait calculé sur la base du minimum de dépenses d'investissement (coût des sous-stations, des caténaires, etc ...) est assez négligeable, il est donc possible dans la plupart des cas de choisir des emplacements qui satisfont aux désirs de l'exploitation et à la nécessité de réduire les investissements pour que l'électrification soit rentable.

La pratique a démontré que les sous-stations doivent être distantes de 30 à 40 km lorsqu'on utilise une tension continue de 3000 volts et quand le trafic est important (100 à 200 trains par jour). En Italie où le trafic est moindre, la distance est de 40 à 50 km. Dans un réseau alimenté à 1500 volts, la distance entre sous-stations est de 15 à 20 km.

Pour une tension déterminée, l'intensité circulant dans la caténaire est proportionnelle au nombre de trains. Considérons une distance 2 L entre deux sous-stations débitant chacune un courant dont la tension au départ est constante.

Supposons que la ligne soit parcourue par un grand nombre de trains de façon que l'on puisse remplacer la charge réelle par une charge de i ampères prélevée par unité de longueur (km) de ligne. Chaque sous-station débitera un courant valant $L \times i$. La chute de tension en un point X quelconque de la ligne est le fait de deux éléments comme le montre la figure 18.

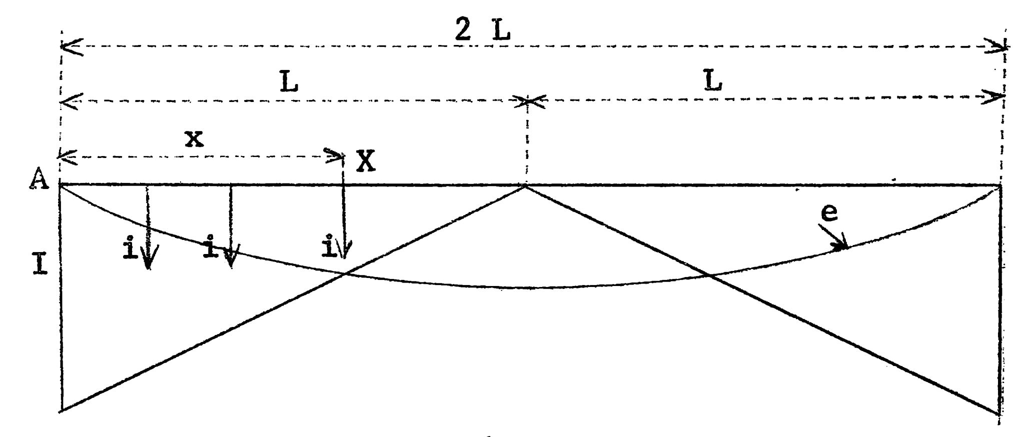


Diagramme des courants dans la caténaire

Diagramme des chutes de tension e

FIGURE 18

Le courant total I se divise en deux parties :

a) une partie $(L-x)i$ qui provoque une chute de tension en X proportionnelle à la longueur du tronçon x

b) une partie $I - (L-x)i$ qui provoque une série de chutes de tension dans le tronçon AX

Appelons R la résistance en ohms par km de ligne. Le courant $(L-x)i$ donne une chute de tension égale à $(L-x)i \times R\ell$ Les courants dérivés en amont du point X donnent une série de chutes de tension qu'il est aisé de sommer.

Considérons un segment dl du tronçon A-X à une distance ℓ de A, il est dérivé en ce point un courant $i \times dl$, la chute de tension qu'il produit vaut $i \times l \times R \times dl$. L'ensemble de ces chutes de tension dans le tronçon A-X vaut :

$$\int_A^X i\, l\, R\, dl = i\, R \int_A^X l\, dl = \frac{i\, R\, x^2}{2}$$

La chute de tension totale en X vaut donc :

$$e = (L-x)\ i \times R + \frac{i\ R\ x^2}{2} = i\ R\ x\ (L - \frac{x}{2}) \quad (1)$$

La chute de tension est maximum quand la dérivée de cette fonction est nulle par rapport à x :

$$\frac{de}{dx} = i\ R\ (L - \frac{x}{2}) - \frac{i}{2}\ R\ x = i\ R\ (L-x)$$

$$\frac{de}{dx} = 0 \text{ pour } L = x$$

Ce résultat était d'ailleurs prévisible, la chute de tension vaut au point L:

$$e_M = \frac{i\ R\ L^2}{2}$$

Le courant i est inversément proportionnel à la tension du réseau pour un service identique :

$$e_M = k\ \frac{R\ L^2}{E}$$

Le pourcentage de chute de tension admissible est indépendant de la tension E, il définit le rendement de la ligne :

$$\frac{e_M}{E} = k\ R\ \frac{L^2}{E^2} = \text{constante} \quad \text{ou} \quad \frac{L}{E} = \text{constante}$$

La distance entre sous-station doit don être, toutes choses égales, proportionnelle à la tension du réseau de traction.

On voit par l'équation (1) que la chute de tension suit une courbe parabolique.

En pratique, le réseau de 1500 V exige l'utilisation de caténaires de plus forte section que le réseau à 3000 V. Souvent des feeders sont placés en parallèle avec les lignes caténaires. Ceci est dû au fait qu'en pratique le réseau à 3000 V fonctionne souvent à la tension de 3300, 3500 V au lieu de la valeur théorique de 3000 V, ce qui accroit encore la souplesse de ce genre de traction. Une autre considération peut encore jouer dans l'emplacement et le nombre des sous-stations.

On peut soit prévoir dans chaque sous-station un redresseur, son transformateur et l'appareillage de protection et de commande en plus de ce qui est nécessaire au service normal, de façon que la mise hors service d'un appareil n'entrave pas le service.

On peut par contre prévoir dans chaque sous-station l'appareillage nécessaire sans aucune réserve mais rapprocher les sous-stations qui l'encadrent.

La première solution utilisée en Belgique, fait usage de réserves concentrées. La seconde solution utilisée sur certaines lignes françaises répartit les réserves sur l'ensemble de la ligne. Les deux solutions peuvent se défendre car les circonstances économiques sont différentes.

En Belgique, les sous-stations sont distantes de 30 à 40 km et peuvent en outre, être installées dans un centre assez important où il est possible de trouver un raccordement direct à la centrale électrique voisine ou à un réseau de distribution pas trop éloigné.

Cette situation est due au fait que la Belgique est un pays à population dense, très industrialisé dont le réseau électrique de production et de distribution est touffu.

En France, en raison des conditions de peuplement et de faible industrialisation, il est impossible de trouver une situation aussi favorable, d'autant plus que le nombre de sous-stations est doublé pour une même longueur de ligne électrifiée, il faut donc que le réseau ferroviaire installe une ligne HT (en fait deux lignes pour raison de sécurité) qui alimente en énergie électrique l'ensemble des sous-stations.

Les figures donnent quelques schémas utilisés. La figure 19 est relative à une ligne triphasée double, la ligne I alimente les sous-stations A, C, E, etc ..., la ligne II les sous-stations B, D, F, etc ... Un défaut sur une ligne I ou II n'interrompt pas l'ensemble du service. La figure 20 montre une autre disposition plus économique qui convient particulièrement bien dans le cas du rapporchement des sous-stations. La solution 21 qui est la plus coûteuse donne le maximum de sécurité.

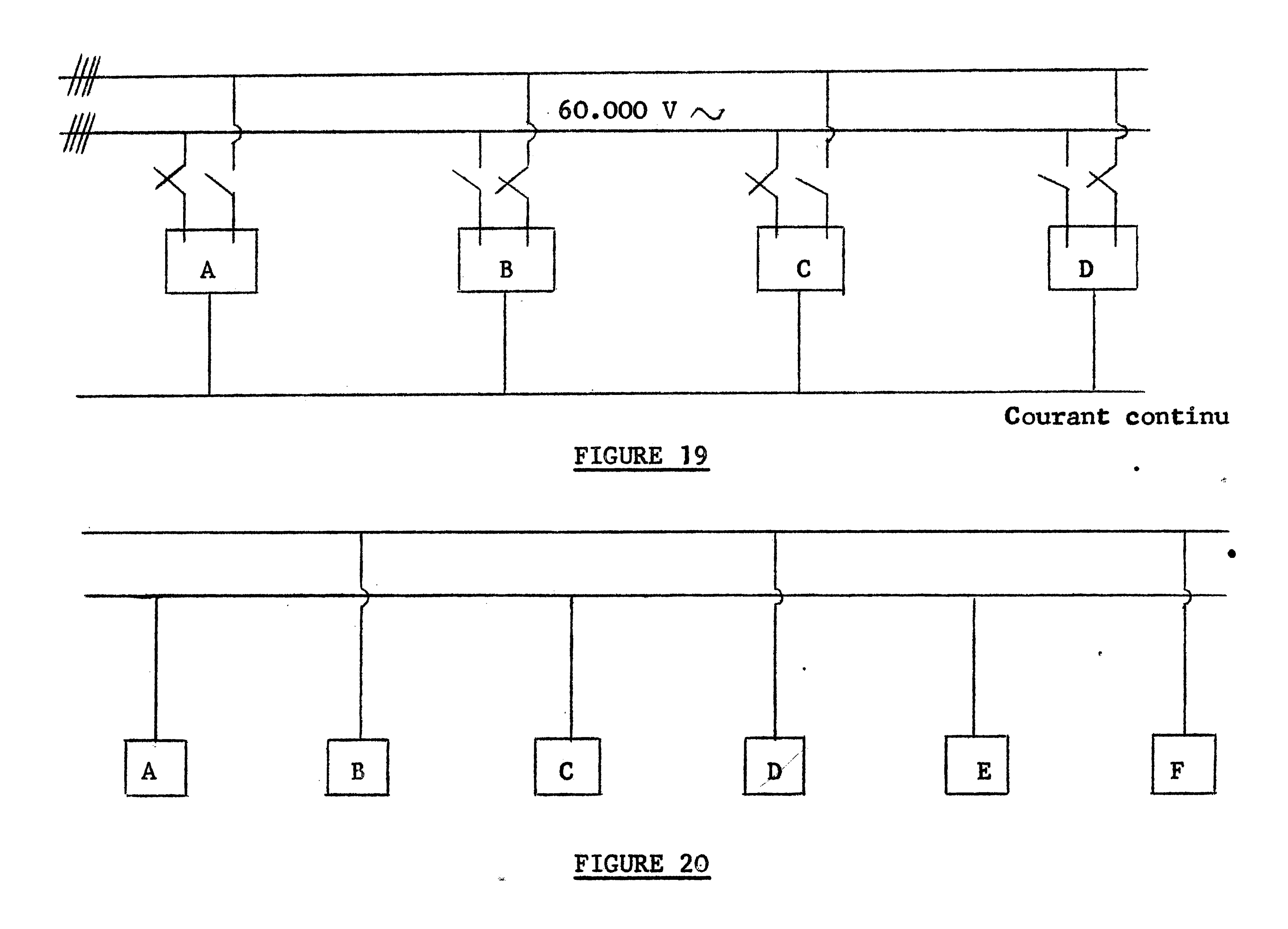


FIGURE 19

FIGURE 20

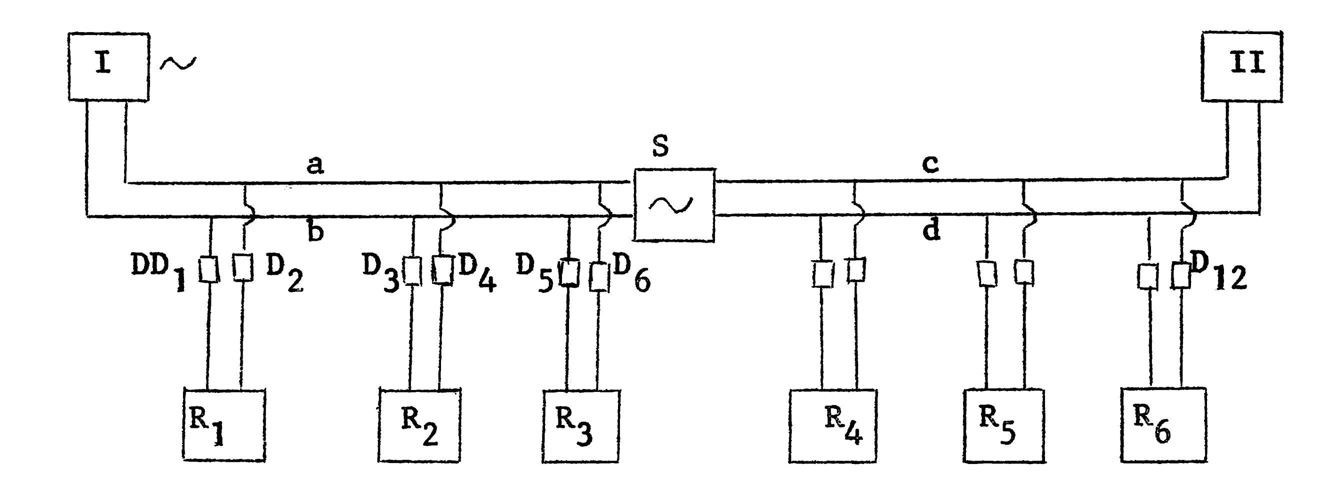


FIGURE 21

Notes relatives à la figure 21 :

I , II points de fourniture à très HT alternative

S poste de couplage alternatif permettant d'effectuer des coupures sur les lignes a, b, c, d.

R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 : sous-stations

D_1 à D_{12} disjoncteurs avec relais directionnels permettant le déclenchement automatique du disjoncteur lorsque la puissance est renvoyée par une sous-station R à l'une des lignes a, ... , d. Il y a donc automatiquement élimination d'un tronçon a, ... , d défectueux et continuité de l'alimentation des sous-stations R_1 à R_6.

SCHEMA DE SOUS-STATION

La figure 22 montre le schéma de principe d'une sous-station belge alimentée en 70000 volts par deux alimentations distinctes afin de garantir la sécurité d'alimentation.

Le jeu de barres à 70000 volts est divisé en trois tronçons qui peuvent être alimentés suivant la position des appareils de coupure.

Les deux tronçons extrêmes permettent chacun d'alimenter un transformateur pour les services auxiliaires, un seul suffit à couvrir tous les besoins de la sous-station.

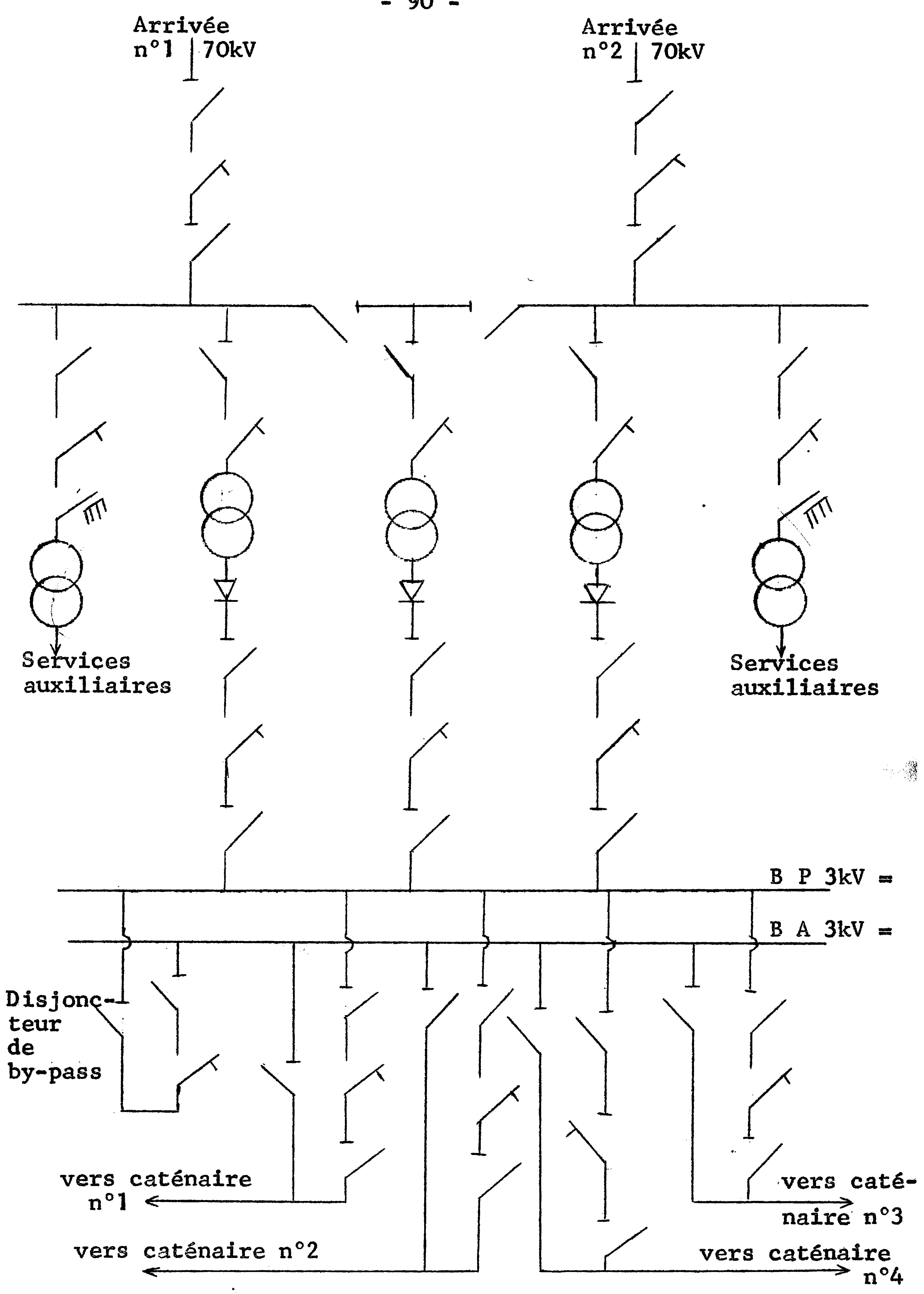

Arrivée
n°1 70kV
Arrivée
n°2 70kV
Services
auxiliaires
Services
auxiliaires
B P 3kV =
B A 3kV =
Disjoncteur
de
by-pass
vers caténaire
n°1
vers caténaire n°2
vers caténaire n°3
vers caténaire
n°4

FIGURE 22

Chaque tronçon alimente un groupe transformateur redresseur. Les redresseurs alimentent la barre 3000 volts repérés B-P sur le schéma. De cette barre partent les divers départs vers les lignes caténaires. Chaque départ est protégé par un disjoncteur encadré de deux sectionneurs.

Un disjoncteur spécial dit de "by-pass" peut alimenter une barre auxiliaire grâce à laquelle il est possible de shunter un disjoncteur de départ moyennant la fermeture de sectionneurs, ceci permet de palier toute avarie d'un disjoncteur de feeder. Ceci permet une économie importante car les disjoncteurs pour courant continu sont très coûteux.

2. CALCUL DE LA PUISSANCE DES REDRESSEURS NECESSAIRES AU SERVICE NORMAL :

a) Cas simple

Considérons une ligne isolée comme l'était, par exemple, en 1935 la ligne Bruxelles Nord-Anvers. Sur cette ligne tous les trains allaient à la même vitesse et étaient identiques.

La consommation d'énergie par train était de 250 kWh. Sur la base d'un graphique donnant la densité des trains, il était facile de déterminer l'énergie consommée pendant la période de l'année la plus chargée. Les deux sous-stations (Haren et Mortsel) étaient situées symétriquement par rapport au milieu de la ligne, elles débitaient la même quantité d'énergie, soit la moitié de l'énergie totale.

b) Cas complexe

Considérons une ligne longue parcourue par divers trains de composition et de charge et de vitesses différentes. Il faut alors représenter sur un graphique espace-temps, l'ensemble du trafic de la ligne. On notera sur chaque train l'intensité consommée. Si celle-ci varie, on notera les différentes intensités de courant absorbé. On reportera ensuite les charges sur les sous-stations qui encadrent la position du train en appliquant la règle des moments.

La figure 23 donne le graphique de la marche de quelques trains et des intensités absorbées au cours du parcours. Le graphique complet devrait comporter l'ensemble des trains.

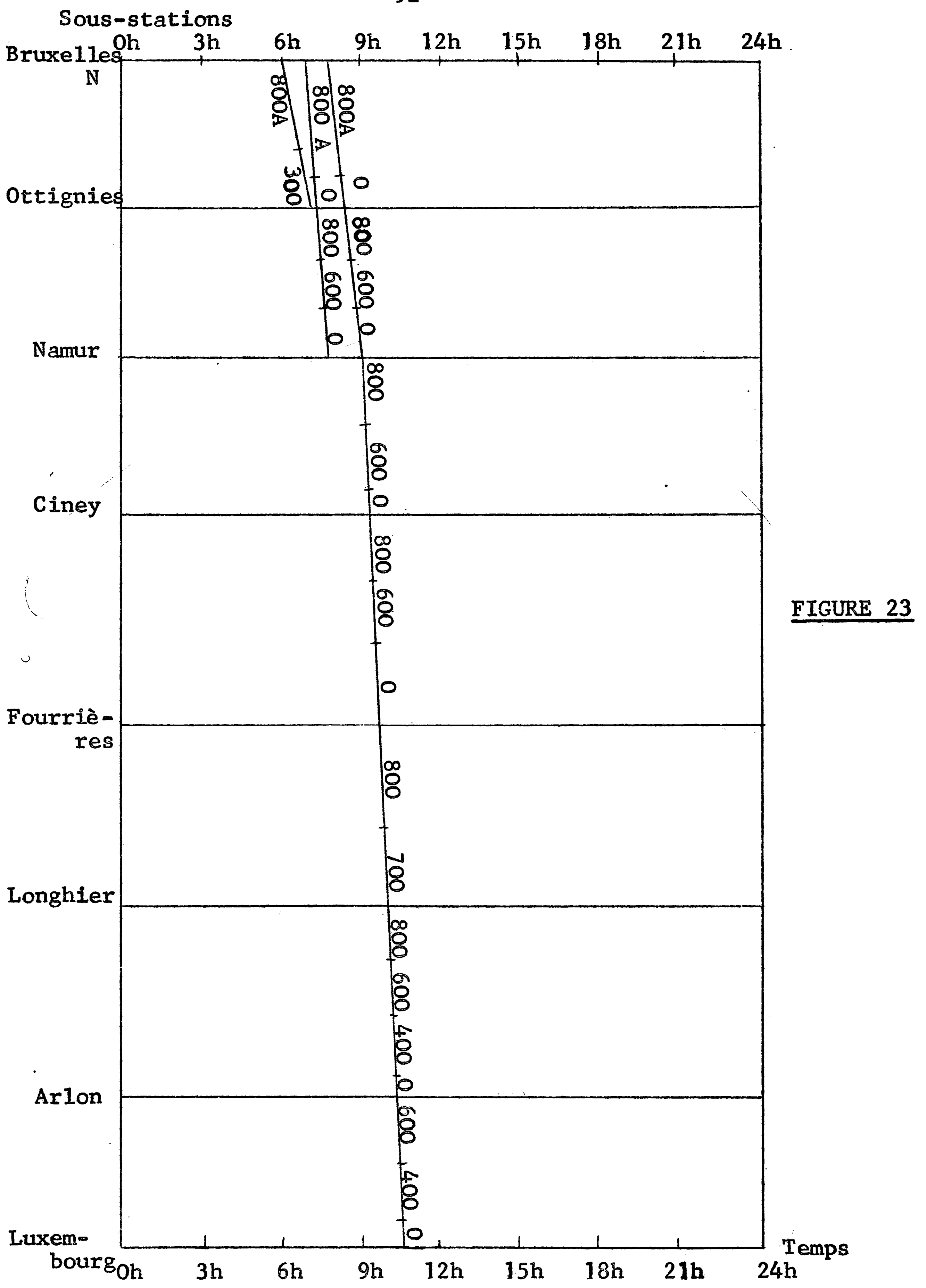

Sous-stations
0h
3h
6h
9h
12h
15h
18h
21h
24h
Bruxelles N
Ottignies
Namur
Ciney
Fourrières
Longhier
Arlon
Luxembourg
800A
800 A
800A
300
0
0
800
800
600
600
0
0
800
600
0
800
600
0
800
700
800
600
400
0
600
400
0
Temps

FIGURE 23

Règle :

Soit L la distance entre deux sous-stations et l la distance du train à l'une des sous-stations, le courant fourni par cette sous-station au train est proportionnel à :

$$\frac{L - l}{L}$$

On cherche par tâtonnement le courant maximum fourni par chaque sous-station(il n'y a aucune raison pour que les pointes de puissance soient simultanées dans l'ensemble du réseau).

Si le service comporte un nombre important de trains de voyageurs, il faut majorer la puissance ainsi calculée de 20% pour tenir compte du chauffage des trains, ce coefficient donne une valeur plus importante pour les trains à arrêts fréquents ce qui correspond d'ailleurs à une consommation plus importante de chauffage en raison de l'ouverture fréquente des portes.

Connaissant la puissance maximum à fournir par les sous-stations, il est alors possible de commander les groupes redresseurs en tenant compte d'un supplément de puissance pour tenir compte des incidents et d'un redresseur destiné à remplacer un appareil défectueux.

Evidemment, ce calcul n'est pas rigoureux, on pourrait objecter qu'après une perturbation grave, le rétablissement de la situation va exiger un supplément momentané d'énergie qui dépasse les prévisions. Il faut cependant noter, que le système sous-station - caténaire est stable en ce sens, que tout accroissement de la consommation entraîne une augmentation de la chute de tension dans la caténaire et les transformateurs, ceci tend à réduire le courant absorbé.

3. POSTES DE MISE EN PARALLELE :

Afin de réduire les chutes de tension dans la caténaire, il est avantageux de mettre en parallèle les caténaires d'une voie double.

Cette mise en parallèle doit être réalisée au moyen de disjoncteurs avec relais de déclenchement directionnels afin de limiter l'influence d'un court-circuit sur un tronçon et d'éviter ainsi la mise hors tension des deux voies.

La figure 24 montre une disposition schématique. Les lettres R_1 et R_2 représentent deux sous-stations, le symbole P représente le poste de mise en parallèle à installer à mi-distance entre deux sous-stations.

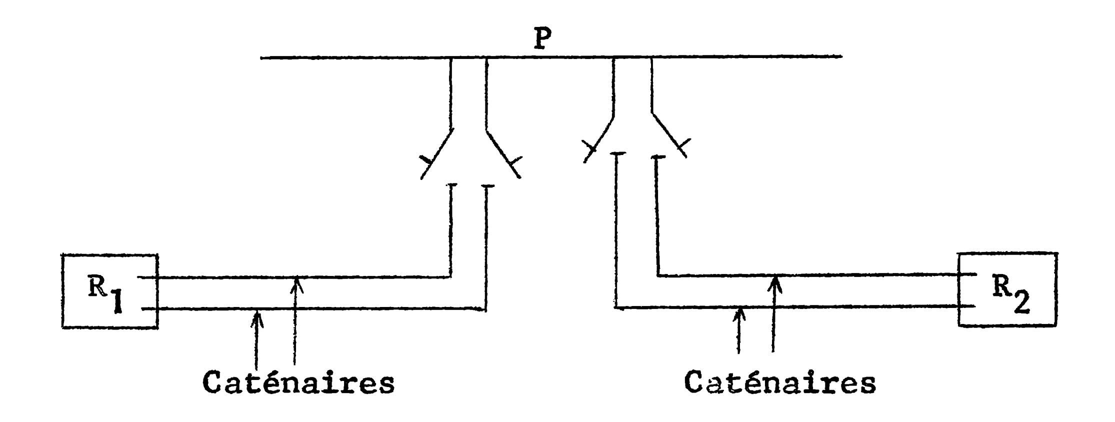


FIGURE 24

---

§ 6. LA TRACTION ELECTRIQUE A COURANT ALTERNATIF

1. GENERALITES :

La traction électrique à fréquence industrielle n'a pu s'imposer au début du siècle en raison de la présence de courants de court-circuit importants lors du démarrage des moteurs asynchrones à collecteur.

Il a été réalisé une seule électrification importante en courant triphasé dont les lignes comportent encore actuellement plusieurs centaines de km en Italie, mais ce mode de traction est actuellement condamné et est en voie de disparition lente.

La seule possibilité d'électrification au début du siècle résidait dans le système monophasé à basse fréquence ou dans le système continu à basse tension 750 V (les redresseurs étaient inconnus et les commutatrices pour tension élevée n'existaient et n'existent pas).

La dernière solution ne convenait que pour des lignes courtes assimilables aux services de tramways en raison du nombre important de sous-stations.

L'unique solution industrielle comportait donc l'établissement d'un réseau à fréquence spéciale 16 2/3 Hz. Le fait de créer

un réseau à fréquence spéciale ne devait pas rebuter nos devanciers, l'Europe était alors équipée de très petites centrales fonctionnant à des fréquences très diverses : 25, 40, 42, 50 périodes. L'apparition d'une fréquence nouvelle ne pouvait donc arrêter les pionniers de l'électrification. Une raison supplémentaire résidait dans le fait que les réseaux ferroviaires étaient amenés à construire leurs propres centrales en raison de la faiblesse du réseau de distribution électrique et il était donc à peu près indifférent de choisir une nouvelle fréquence : 16 2/3.

Celle-ci n'a d'ailleurs pas été choisie immédiatement. Les promoteurs de l'électrification préconisair 15 Hz, ils se sont ralliés ultérieurement à 16 2/3 Hz quand plus ptard, il y eu possibilité d'interconnecter les réseaux électriques ferroviaires et les réseaux électriques de distribution.

2. ALIMENTATION D'UN RESEAU FONCTIONNANT A 16 2/3 Hz :

La tension de la caténaire est distribuée dans un réseau alimenté par des sous-stations distantes de 80 à 100 km.

Il y a trois possibilités :

1) Création d'une ou plusieurs centrales (éventuellement achat d'une tranche de centrale) fournissant l'énergie sous 110.000 V 16 2/3 Hz à diverses sous-stations qui sont alors très simples, ces dernières alimentant les caténaires.

La Deutsche Bundesbahn, les chemins de fer fédéraux suisses ont adopté cette solution qui repose sur la base historique que les réseaux bavarois et suisse ont dû construire leurs centrales au début de l'électrification.

2) Création d'une ou d'un petit nombre de sous-stations de conversion raccordées au réseau public. Ces sous-stations de conversion très importantes jouent le rôle des centrales du cas précédent.

3) Raccordement de chaque sous-station alimentant la caténaire au réseau de distribution et installation des machines spéciales de conversion dans chaque sous-station (solution suédoise).

Le choix de la solution dépend de la configuration du réseau et des circonstances locales. Un bilan comparatif doit être établi.

S'il était question d'établir un réseau ferroviaire électrifié au Sahara, la solution 1 s'imposerait. En Suède, pays extrêmement étendu, il était impensable d'utiliser cette solution qui

eut conduit à la construction d'un réseau à 110000 V couvrant tout le pays alors qu'il existe des centrales hydrauliques en d'assez nombreux points.

3. DEMARRAGE D'UN ENGIN ALIMENTE A 16 2/3 Hz :

La souplesse de distribution du courant alternatif permet d'alimenter la locomotive à 15000 V et de ne fournir aux moteurs qu'une tension très faible. Cette tension peut être augmentée progressivement. Les résistances de démarrage sont donc inutiles. Il n'y a pas de perte en effet Joule au démarrage/ On peut prévoir un nombre de crans suffisamment élevé au transformateur de façon que le courant puisse être ajusté à une valeur déterminée. La conduite du train sera plus simple qu'en courant continu où le conducteur ne dispose que d'un petit nombre de possibilités de conduite.

Le moteur à basse tension est moins bien isolé que les moteurs à 3000 V, l'isolant électrique empêche la diffusion des calories. Le moteur alternatif pourra donc développer plus de puissance que le moteur à courant continu à volume égal.

Puissance maximum d'une locomotive :

Suisse - Autrichienne	6000 CV
Allemande	5000 CV
Française	4000 CV
Belge	3000 CV

Les premières sont alimentées en monophasé, la troisième en 1500 V continu, la dernière en 3000 V continu. Il convient de faire remarquer que les réseaux autrichien et suisse sont les plus durs du monde et que l'on comprend que l'électrification ait été poussée à son maximum dans ces pays. Il en est partiellement de même en Bavière. En Belgique, pays de trafic très dense mais où les trains plus nombreux sont moins lourds, la puissance de 5000 ou 6000 CV ne serait jamais employée. La puissance de 6000 CV n'est utilisée que pour remorquer des trains de voyageurs très longs et roulant à grande vitesse.

4. SCHEMA DE PRINCIPE D'ALIMENTATION DES MOTEURS :

La figure 25 représente le couplage pour un moteur.

En fait, les quatre moteurs sont couplés en parallèle. Le secondaire du transformateur possède 6 prises de courant (1 à 6).

En fermant 1 le moteur M est alimenté à une tension e faible. En fermant 1 et 2 la tension est un peu plus élevée. En fermant 2 et en ouvrant 1, la tension devient 2 e si l'on suppose qu'il y a deux fois plus de spires au secondaire.

En fermant 2 et 3, la tension s'élève encore. En ouvrant 2 et en laissant 3 fermé, la tension devient 3 e, et ainsi de suite.

L'on voit que moyennant 6 contacteurs, l'on a pû disposer de 11 tensions différentes.

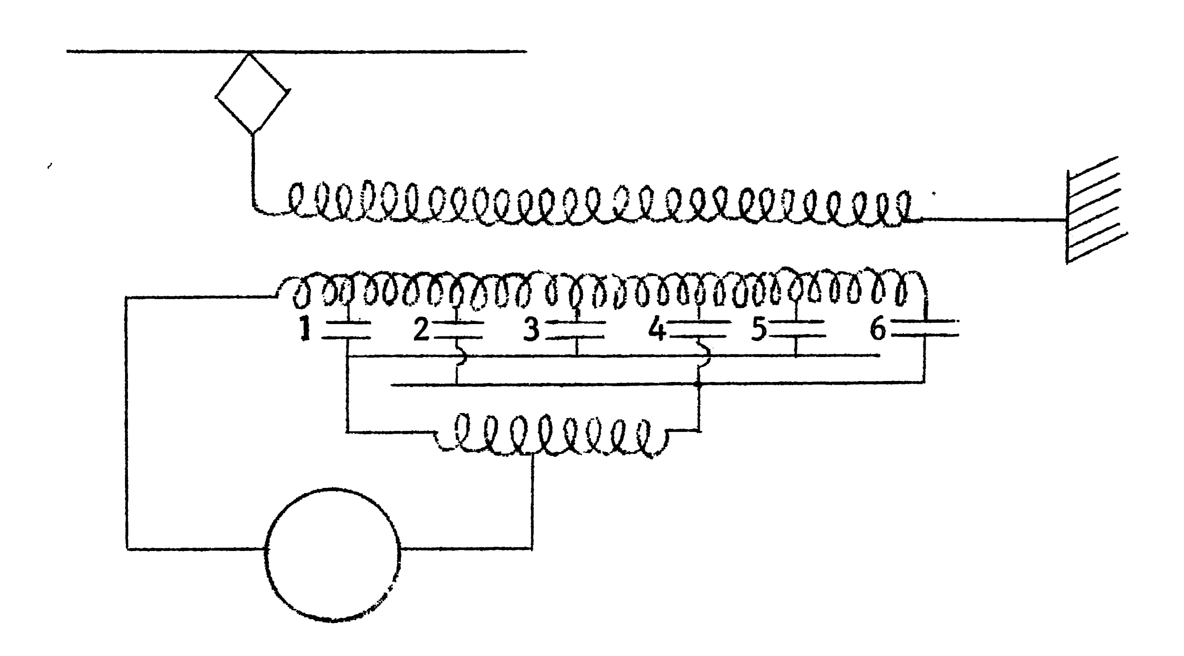


FIGURE 25

Un autre dispositif le FEINREGLER utilisé par la Deutsche Bundesbahn permet de multiplier encore les possibilités. Cet appareil dont la traduction littérale signifie "régulateur de précision" se compose d'un autotransformateur qui induit dans le circuit des moteurs une tension qui se superpose à celle donnée par l'appareillage précédant. La tension donnée par l'autotransformateur peut être en phase, opposée ou concordante avec la tension donnée par l'appareillage précédent. Autrement dit, entre deux valeurs de tension n e et (n + 1/2)e , l'on peut ajouter ou retrancher une tension quelconque comprise entre 0 et e/2, ce qui permet de multiplier à l'infini les possibilités de réglage.

On a pu pousser les choses au point de graduer l'ampèremètre non plus en ampères mais en Tonnes d'effort. Le conducteur a ainsi pleinement conscience de la façon optimum de conduire son train. Un trait rouge sur l'appareil montre la limite d'emballement des moteurs ce qui est extrêmement favorable à la conduite rationnelle du train.

Le schéma du Feinregler est donné à la figure 26. Il se compose d'un autotransformateur dont les différentes prises sont raccordées aux lamelles d'un collecteur fixe sur lequel peuvent glisser deux balais. La tension entre les deux balais est fonction en grandeur et en sens de la position des balais.

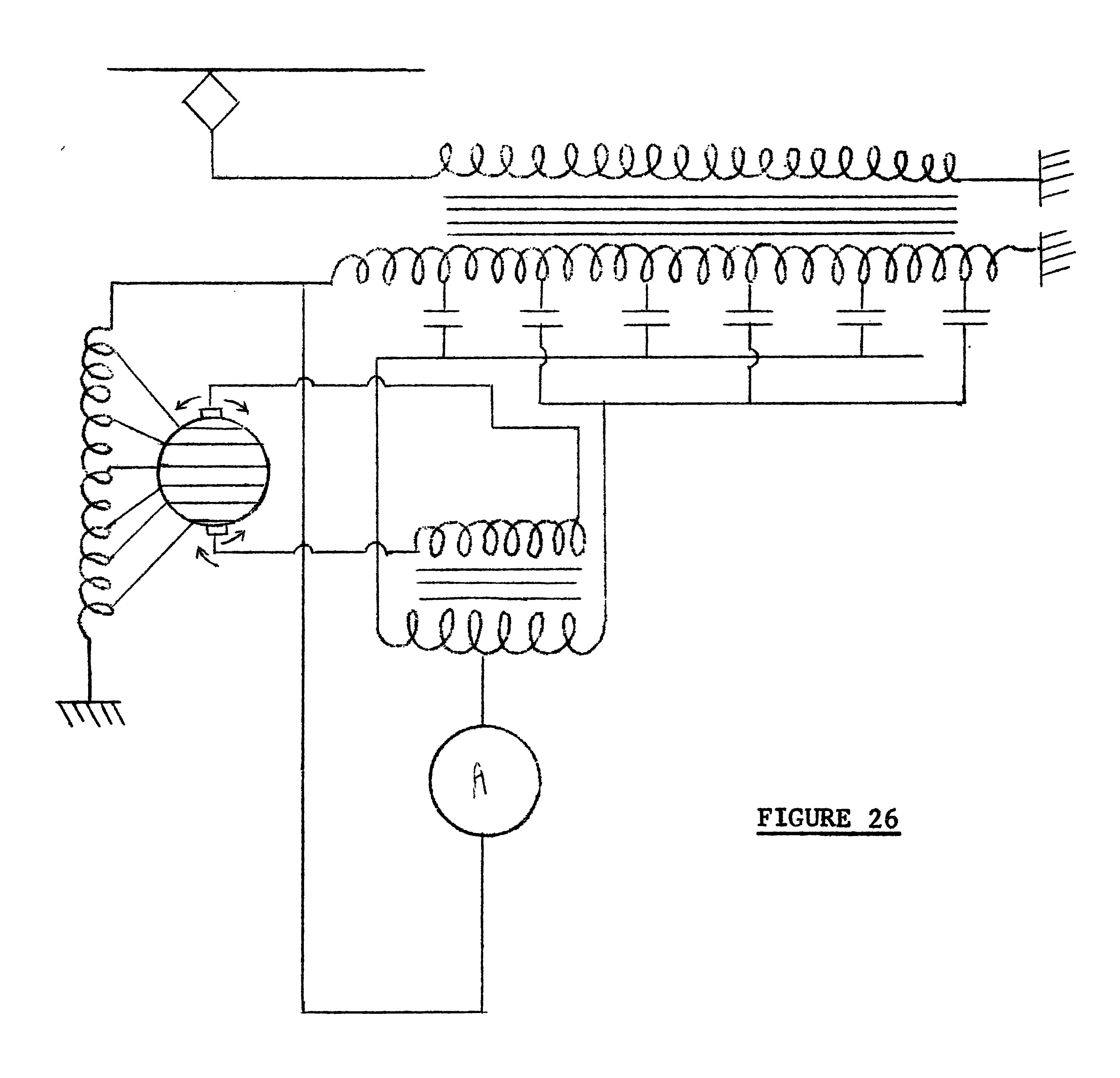


FIGURE 26

Le courant du Feinregler alimente le primaire de l'enroulement d'un transformateur dont le secondaire constitue la self de réglage de l'appareil précédent.

5. ELECTRIFICATION A 50 PERIODES :

Ce système a reçu ces dernières années, une impulsion nouvelle permise par le développement des nouvelles techniques de l'électricité.

Ce système n'aurait rencontré aucune faveur si la technique des redresseurs n'avait fait des progrès surprenants. En effet, l'utilisation de moteurs directs à 50 Hz s'est avérée être un échec. Il suffit de visiter un atelier de réparation de matériel roulant pour s'en convaincre. L'idée d'utiliser un groupe rotatif sur la locomotive comportant un moteur monophasé et un générateur triphasé ou continu ne peut être considérée que comme une solution de fortune. Il est certain que la complication, le prix et l'entretien de ces machines empêchent toute extension du système.

Le système à 50 Hz peut survivre grâce au développement inattendu et disons le providentiel pour les promoteurs, des redresseurs monoanodiques ou au silicium.

On a objecté au système qu'au lieu de prévoir les redresseurs dans les sous-stations, on les installait sur les engins: locomotives ou automotrices. Enoncée sous cette forme la critique est matériellement fondée mais elle cache le fait que le système permet d'établir une distribution en courant alternatif donc simple, moins coûteuse et que les engins peuvent être équipés d'un transformateur à prises multiples. Les redresseurs fourniront donc une tension continue réglable ce qui donnera à l'engin tous les avantages du système à courant continu (couple élevé) et du système alternatif (distribution souple et absence de résistances de démarrage).

Les redresseurs peuvent être du type :

a) Excitrons b) Ignitrons

L'excitron est un redresseur monoanodique à vapeur de mercure dont la tache cathodique est entretenue en permanence par un circuit d'excitation qui débite en permanence.

L'ignitron est un redresseur monoanodique à vapeur de mercure dans lequel la tache cathodique est créée au moment où l'appareil doit débiter. L'appareil est allumé quand une tension assez raide est appliquée à une électrode de carborandum qui touche le bain de mercure. La différence de potentiel entre cette

électrode et le bain provoque l'apparition de la tache cathodique. Cette électrode est appelée Igniter.

Actuellement, la maison SIEMENS a mis sur le marché des redresseurs au silicium dont le rendement atteint 99,8%. L'échauffement est donc faible, le problème de la ventilation de ces derniers redresseurs est simplifié.

Les Chemins de fer du B.C.K. (Congo exBelge) ont un certain nombre de locomotives électriques à ignitrons et deux d'entre elles sont équipées de redresseurs au silicium, de moindre encombrement et de meilleur rendement que les ignitrons.

6. CARACTERISTIQUE PARTICULIERE DE LA DISTRIBUTION A 50 Hz :

Du point de vue de l'électricien, la distribution monophasée présente quelques sujétions nouvelles. L'utilisation de la fréquence 50 Hz a amplifié les phénomènes de self induction constatés déjà avec la fréquence 16 2/3 Hz ce qui a conduit au choix de la tension de 25000 V pour un même écartement des sous-stations. Cette tension élevée entraîne l'appropriation des tunnels, ponts, etc ... d'où frais élevés surtout en pays accidenté.

Le skin effect joue déjà un certain rôle, c'est ainsi que suivant M. Garreau dans son cours sur la traction électrique, l'impédance par km de voie double passe de 0,068 + j 0,092 à 0,084 + j 0,278 de 16 2/3 à 50 Hz.

En outre, la tension élevée sinusoïdale de 25000 V produit deux effets dans les circuits voisins (par exemple une ligne électrique ou une caténaire en réparation) :

a) Une induction électrostatique

b) Une induction électromagnétique

L'induction électrostatique est assez élevée en raison de la valeur élevée de la tension. L'induction électromagnétique est fonction de di/dt et des dispositions locales, elle est donc élevée en courant monophasé 50 Hz.

Pour une intensité primaire de 400 A, l'induction électromagnétique peut, d'après M. Garreau atteindre 20 volts par km de ligne.

Des précautions spéciales doivent être prises pour la réparation de caténaire voisine d'une ligne parcourue par des trains. Les lignes téléphoniques doivent être mises sous câbles.

7. COMPARAISON ENTRE LES DIVERS SYSTEMES :

Chaque système possède des avantages et des inconvénients Un bilan complet doit être établi dans chaque cas particulier afin de déterminer le système à choisir.

Ce bilan doit comprendre notamment le prix plus élevé des engins alimentés à 50 Hz dont le prix dépasse celui d'un engin similaire à 3000 V de 20 à 40%. Le prix de l'électrification des tunnels sera très élevé en monophasé.

Pour les réseaux dont l'électrification est avancée, il est souvent trop tard pour modifier l'orientation. Il y a trois exceptions à ce principe :

a) Le réseau hollandais qui primitivement équipé en courant alternatif opta ensuite pour le système 1500 V continu. Ceci fut réalisé au début de l'électrification.

b) Le réseau italien qui profita des destructions de la guerre pour convertir partiellement le système triphasé en continu à 3000 V et qui continue dans cette voie.

c) Le réseau français où les distances sont telles que deux systèmes peuvent coexister.

Il semble bien que pour de nouvelles électrifications dans les pays où l'électrification débute, le choix se limite entre le système 3000 V et le système monophasé 50 Hz avec redresseurs au silicium.

---

§ 7 . LA TRACTION DIESEL-ELECTRIQUE

Le moteur diésel est un engin assez mal adapté à la technique ferroviaire. Il tourne à une vitesse comprise entre la vitesse de ralenti et la vitesse maximum.

La liaison mécanique simple entre moteur et roues est déjà difficile à concevoir pour cette seule raison.

En outre, au démarrage, la locomotive doit pouvoir entraîner la charge avec le maximum d'accélération ce qui signifie que le moteur doit développer le maximum de puissance c'est-à-dire tourner à la vitesse maximum, ce qui est incompatible avec une transmission rigide.

L'utilisation de boites de vitesses à 4 ou 5 crans permettrait l'utilisation de la puissance maximum pour 4 ou 5 points de la courbe Puissance-Vitesse ce qui n'est guère compatible avec la puissance assez faible du moteur diésel de locomotive (2000 CV). Il faut utiliser un accouplement qui permet l'utilisation de la puissance complète du moteur diésel sur toute l'étendue de la courbe Puissance-Vitesse.

Deux solutions sont possibles :

1) l'accouplement hydraulique du genre Voith

2) l'accouplement électrique

PROPRIETES A EXIGER DE L'ACCOUPLEMENT ELECTRIQUE

Les moteurs électriques qui attaqueront les essieux doivent développer :

- un fort couple durant le démarrage
- une puissance constante c'est-à-dire un couple inversément proportionnel à leur vitesse de rotation

La première exigence entraîne l'obligation d'une régulation compliquée de la génératrice de façon que le produit :

$$U \times I = Cte$$

Les termes U et I représentent respectivement la tension et le courant de la génératrice.

La difficulté réside dans le fait que si la tension de la génératrice est constante, le courant absorbé par les moteurs

dépend de la vitesse des moteurs c'est-à-dire que les moteurs ne développent plus leur pleine puissance à grande vitesse.

Il faut donc relever la tension de la génératrice au fur et à mesure que le courant diminue. Ce but est atteint par le couplage Westinghouse utilisé à la S.N.C.B.

La génératrice accouplée au moteur diésel est pourvue de trois excitations :

a) une excitation indépendante qui peut être réglée par le conducteur de la locomotive

b) une excitation shunt qui renforce l'effet de la première

c) une excitation anticompound créée par le courant débité par la génératrice

Les ampères-tours de l'enroulement anticompound sont opposés à ceux fournis par les deux premiers enroulements.

REALISATION PRATIQUE :

La génératrice est équipée de 6 pôles. Deux d'entre eux de section faible portent les enroulements anticompounds. La saturation de ces pôles pour les intensités élevées réduit l'effet anticompound durant la période de démarrage.

---

§ 8 . LES ENGINS A ACCUMULATEURS

La traction électrique par accumulateurs a été essayée au début du XXe siècle, elle a rapidement échoué en raison de la fragilité des accumulateurs de l'époque. Toutefois, l'amélioration ultérieure de la fabrication des accumulateurs a donné une nouvelle impulsion à ce mode de traction qui présente les avantages suivants :

1) Tous les avantages de la traction électrique en courant continu

2) Aucun des inconvénients financiers de la traction électrique

3) Aucun des inconvénients d'exploitation propres à la traction électrique en raison de la présence des lignes de contact.

Comme inconvénient on peut noter le rayon d'action assez limité des engins, le poids de la batterie et la nécessité de recharger la batterie journellement.

Les chemins de fer allemands suivis depuis peu par les chemins de fer italiens et anglais ont mis en service des automotrices à accumulateurs.

Les chemins de fer suédois ont également des locomotives de manoeuvre à accumulateurs. Ces derniers engins sont équipés de batteries alcalines tandis que les autres sont équipés de batteries au plomb.

Les batteries d'accumulateurs ont fait ces dernières années d'importants progrès comme le montre le tableau ci-dessous :

ANNEE	CAPACITE EN kWh PAR kg DE BATTERIE
1950	15,5
1955	23

La capacité en traction ferroviaire se mesure au régime de décharge en trois heures.

La capacité d'une batterie est fonction du régime de décharge. Si on appelle 1 la capacité nominale au régime de 3 h, la capacité mesurée au régime 10 h sera comprise entre 1,15 et 1,2 de la capacité nominale tandis que la capacité au régime unihoraire n'est qu'environ 0,6 de la capacité nominale.

Ceci montre toute l'importance du régime imposé à l'engin, il ne conviendra pas pour un service à arrêts rapprochés, surtout dans une zone montagneuse car les courants de démarrage sont trop intenses et trop rapprochés.

Pour une raison bien compréhensible, on utilisera le freinage à récupération.

REALISATIONS RECENTES DE LA DEUTSCHE BUNDESBAHN

1) Engin type E T A 150

Nombre de places assises	68
Nombre de strapontins	12
Poids sans les voyageurs	47,8 T
Capacité de la batterie	353 kWh
Rayon d'action	250 à 350 km
2 moteurs de	135 CV

Cet engin peut remorquer une voiture dont les caractéristiques sont :

Nombre de places assises	68
Strapontins	14
Poids sans les voyageurs	22 T
Rayon d'action de l'automotrice et de la remorque	170 à 250 km

2) Automotrice type E T A 176

Nombre de places assises	72
Nombre de strapontins	6
Poids sans les voyageurs	54,3 T
Capacité de la batterie	390 kWh
Rayon d'action	250 à 350 km
2 moteurs de	135 CV

Cet engin peut entraîner une remorque dont les caractéristiques sont les suivantes :

Nombre de places assises	96
Pas de strapontins	
Poids à vide	26,5 T
Rayon d'action de l'automotrice et de la remorque	170 à 250 km

Ces engins accouplés en unités multiples 2 motrices + 2 remorques rendent des services sur les lignes accessoires dont l'électrification n'est pas rentable.

Les parcours peuvent être allongés si l'on prévoit en certains points de stationnement, la recharge de la batterie ou son remplacement.

Ces engins sont économiques pour ce qui concerne l'énergie utilisée, en effet la recharge des batteries est effectuée dans la plupart des cas durant les heures de nuit, ce qui permet d'obtenir un tarif réduit.

Si ces lignes sont utilisées pour assurer le trafic sur des lignes voisines de lignes électrifiées, le tarif peut être celui de l'énergie électrique de traction, ce qui est également favorable.

§ 9 . LES TRANSPORTS URBAINS

1. TRAMWAYS :

Les transports urbains ont considérablement évolué au cours des 10 dernières années : le tramway a du céder devant l'autobus dans les agglomérations de faible importance.

Du point de vue rendement financier, les éléments du bilan peuvent être résumés comme suit :

1) Le réseau de tramway doit entretenir non seulement la voie mais encore la partie de la route comprise entre les files de rails, il assure évidemment la pose et l'entretien des lignes de contact

2) La société d'autobus n'intervient pas dans le paiement de la construction ou de l'entretien des routes, de l'éclairage public, etc ... Tous ces frais sont à charge de la communauté, car la redevance pour la plaque de roulage ne couvre qu'une petite partie des frais totaux

3) La résistance au roulement d'un tramway est 4 à 5 fois inférieure à celle d'un véhicule sur pneus. La dépense d'énergie exprimée par voyageur-kilomètre transporté est bien plus faible en tramway qu'avec un autobus.

Tous ces éléments montrent qu'il faut un trafic intense pour permettre au tramway de concurrencer victorieusement l'autobus. Ce trafic ne peut être fourni que par les grandes agglomérations où les voyageurs sont nombreux et se déplacent à des distances assez grandes.

Il est d'ailleurs heureux, du point de vue de la santé publique que le service d'autobus ne s'étende pas dans les grandes agglomérations en raison des produits incomplets de la combustion déversés dans l'atmosphère par les moteurs diésel.

La situation en 1957 se présentait comme suit dans l'agglomération bruxelloise :

Nombre de voyageurs transportés journellement en tramway 700.000

Nombre d'incidents d'exploitation entrainant le retrait de service du véhicule :

Tramway 11/100.000km

Trolleybus 17/100.000km

Autobus 60/100.000km

Perfectionnements apportés aux tramways

Les tramways récents ont été équipés des perfectionnements récents appliqués en traction ferroviaire:

1) les moteurs sont puissants

2) l'accélération et le freinage sont énergiques

3) la suspension des véhicules a été améliorée

2. METROPOLITAIN :

Dans les agglomérations dépassant 1.500.000 habitants, le problème du transport des voyageurs en surface devient impossible.

Il a fallu aménager un réseau ferroviaire souterrain de plus en plus dense.

La technique du métropolitain est très apparentée à la technique ferroviaire.

Une seule exception est prévue : en raison du danger d'accident, le croisement à niveau des lignes est interdit, ce qui complique l'établissement des gares.

Il n'est pas fait usage de caténaires mais d'un troisième rail conducteur établi le long de la voir sur lequel frottent les appareils de captation de courant.

Certaines lignes aériennes en France (Paris-St Germain par exemple) et surtout en Angleterre sont équipées de troisième rail conducteur. Des précautions spéciales doivent être prises aux croisements (interruption momentanée du rail) aux passages à niveau pour éviter tout accident.

En pleine voie le rail conducteur est recouvert d'une enveloppe isolante en bois qui ne laisse passer le frotteur de contact que sur la partie inférieure du rail, ceci complique évidemment la pose de ce dernier qui doit être fixé en porte à faux.

Il est toujours fait usage de courant continu comme sur les tramways. La tension utilisée dans le métropolitain est au plus de 1200 volts (Hambourg) souvent elle est limitée à 500 ou 800 V.

Dans la plupart des grandes villes européennes les métropolitains existants continuent à être développés et des villes comme Madrid, Rome, qui n'en avaient pas commencent à être équipées.

§ 10 . LES LIGNES D'ADDUCTION

1. SUSPENSION TRAMWAY :

Les lignes d'adduction pour tramways urbains sont suspendues par l'intermédiaire d'isolateurs à des fils de suspension ancrés dans les immeubles de la rue.

En pleine cmapagne, les fils d'adduction sont attachés par des isolateurs à des potences fixées sur des poteaux. Ce dernier dispositif appelé "suspension tramway" est utilisé en technique ferroviaire pour l'équipement de gares de formation ou de voies de garage parcourues à faible vitesse.

2. SUSPENSION CATENAIRE :

Dès que la vitesse des engins dépasse 30 à 40 km/h la suspension tramway ne peut plus être appliquée en raison du choc du frotteur sur le "point dur" formé par la fixation du fil sur l'isolateur.

On utilise alors une suspension composée.

Caténaire simple

Le fil de contact est suspendu en de nombreux points à un porteur principal fixé sur les potences des poteaux (figure 27).

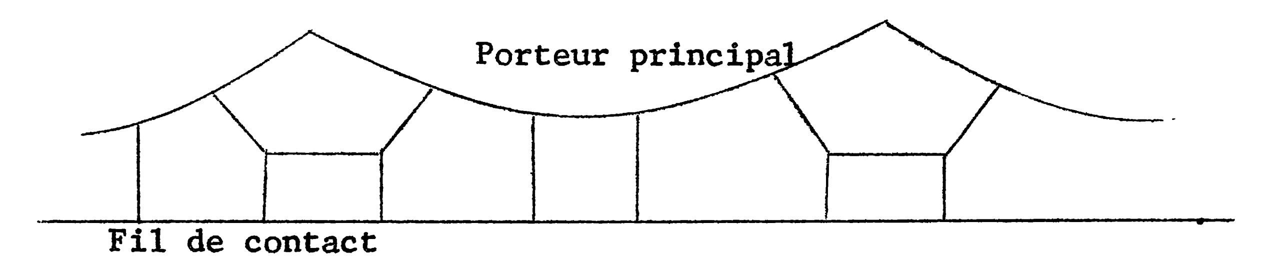


FIGURE 27

Souvent et notamment en France et en Belgique, on utilise non seulement un porteur principal mais encore un porteur auxiliaire (figure 28).

Le porteur auxiliaire porte le fil de contact (ou les fils de contact qui sont fréquemment dédoublés au moyen de pendules avec étriers coulissants).

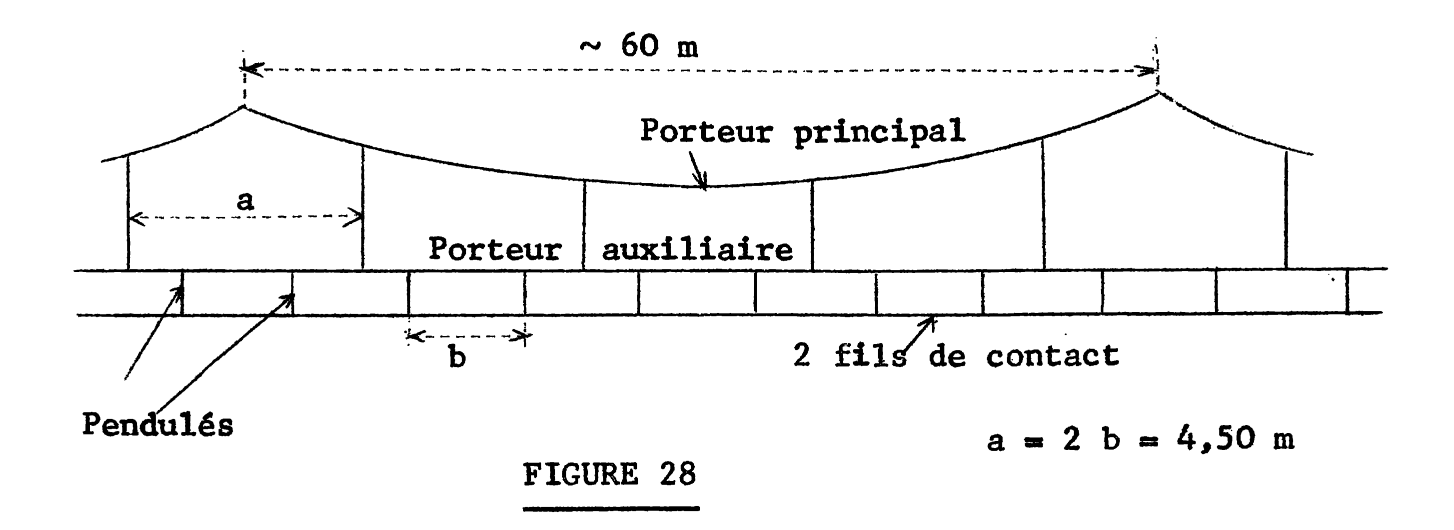


FIGURE 28

Le porteur auxiliaire est maintenu au droite des poteaux par un "antibalançant" qui interdit les déplacements transversaux du ou des fils de contact tout en ménageant la flexibilité de la ligne de contact.

Les fils de contact sont placés avec un désaxement variable de façon à répartir l'usure du frotteur de pantographe. Ces fils de contact sont repliés à l'antibalançant par une biellette qui permet le déplacement vertical.

Les fils de contact sont tendus horizontalement par un dispositif tendeur SIEMENS placé tous les 1500 m. Ce dispositif est formé de deux poulies solidaires en rotation. Sur la plus petite est fixée le fil de contact. Un poids tendeur dont le câble peut s'enrouler plus ou moins fort sur cette poulie maintient une tension mécanique constante dans le fil de contact. Il va de soi, qu'un isolateur est intercalé entre la petite poulie et le fil de contact.

Le dispositif est généralement monté comme indiqué au croquis (figure 29).

Le fil a est relevé lors du croisement avec le fil b.

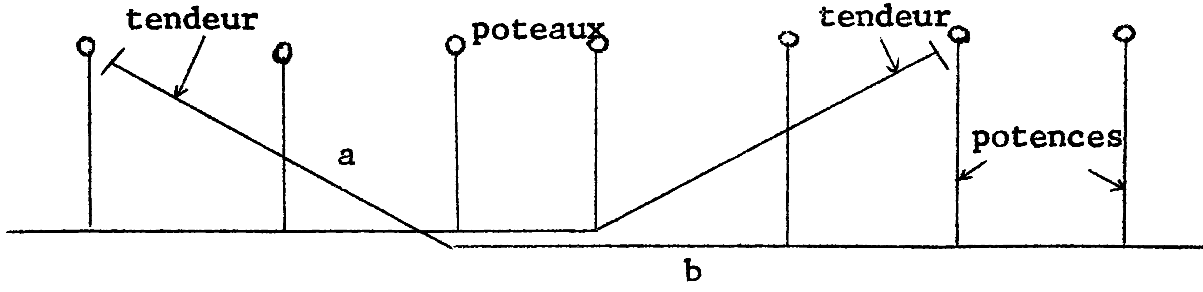


FIGURE 29

3. TRONCONNEMENT DE LA LIGNE :

Pour éviter qu'un défait sur un engin ou le bris d'un isolateur ne mette tout le réseau hors tension, il faut prévoir un sectionnement du réseau.

Dans les lignes de tramways, les feeders qui portent des sous-stations alimentent un certain nombre de lignes de trolley isolées électriquement par des isolateurs en matière moulée, qui maintiennetn un écart entre les fils au croisement des fils.

Dans les gares, les fils de chaque voie sont isolés électriquement par des isolateurs à lame d'air ou par des isolateurs en porcelaine ou en matière moulée.

Un sectionnement à lame d'air est constitué de deux caténaires complètement isolées l'une de l'autre suivant le principe de la figure 29.

Les divers tronçons de caténaire sont alimentés à partir d'un poste central appelé poste d'alimentation, chaque tronçon est équipé d'un disjoncteur ou d'un sectionneur à coupure en charge, parfois d'un simple sectionneur.

=================================